

文章编号: 0559-9350(2022)06-0655-11

京津冀水资源-粮食-能源-生态协同调控研究 I: 方法与模型

常奂宇^{1,2}, 赵勇¹, 桑学锋¹, 李海红¹, 何凡¹, 翟家齐¹

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

摘要: 京津冀是我国重要的粮食、能源消费地, 但水资源已经成为制约区域粮食、能源和生态可持续发展的关键要素。为优化水-粮-能-生系统间关系, 实现水-粮-能-生关联视角下多水源协同调控, 本文以 GWAS 模型为基础, 通过改进水资源调配模块, 添加粮食生产、能源消耗和层次化需水预测模块, 构建了实现各系统关键要素传递和互馈的水-粮-能-生协同调控模型。根据京津冀水-粮-能-生系统紧密耦合的特征, 建立保障水安全、粮食安全、低碳发展路径和生态健康的协同发展目标, 提出了基于 NSGA-II 和耦合协调度的协同优化算法与综合协同指数, 以实现水-粮-能-生耦合系统协同调控方案优化求解。

关键词: 京津冀; 水-粮-能-生; 协同调控; GWAS; 综合协同指数

中图分类号: TV213

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20220065

1 研究背景

水、粮食、能源是人类生存和社会稳定的三大战略性支撑要素, 也是当前经济社会可持续发展的重要物质保障^[1]。美国国家情报委员会预计到 2030 年, 全球水、粮食和能源的需求量将分别比 2012 年增加 40%、35% 和 50%, 确保充足的水、粮食和能源供给已经成为世界各国面临的长期压力^[2]。

水、粮食和能源既是相对独立又是紧密关联的耦合互馈系统, 存在着复杂的相互关系, 一个子系统的发展往往需要消耗其他两个子系统的资源。在过去一段时间, 水、粮食、能源之间相互影响的程度较低, 但随着水、粮食、能源系统间相互制约、相互依存的关系加深, 任何一个要素的失衡都会严重阻碍经济社会可持续发展, 在人口密集和生态脆弱的地区问题尤其突出。如在咸海流域, 由于上下游国家对于农业用水和能源补偿之间没有达成共识, 导致该地用水无节制增长, 进而导致咸海面积萎缩 90%, 并引发严重的生态危机^[3]。在美国加州中央谷地地区, 由于大规模的地下水开采灌溉导致的地下水位急剧下降, 已经引发了众多生态环境问题, 而地下水位下降也使得过去 20 年中央谷地机井耗电量增加了 15%^[4-6]。巴西等国家采用生物质能(玉米制乙醇)来部分替代化石燃料, 有助于大幅减少温室气体排放^[7], 但有学者研究发现生物质能在生产过程中将消耗大量水资源^[8], 同时农作物被用于生产生物质能, 也将对粮食安全带来不利的影响^[9]。可以看出, 水、粮食、能源之间的复杂关系往往和生态系统息息相关, 而且在人口增长、气候变化、城市化、工业化、生活水平提升等因素驱动下, 对于缺水地区, 水资源日益短缺、粮食供给变化波动、能源需求愈加旺盛、生态功能受损严重, 因此开展水资源-粮食-能源-生态耦合系统(后面简称为“水-粮-能-生耦合系统”)研究, 尽快形成可持续的水-粮-能-生耦合系统优化管理方案已成为区域可持续发展的当务之急。

收稿日期: 2022-01-26; 网络首发时间: 2022-06-16

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20220614.1632.002.html>

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(52025093); 国家重点研发计划项目(2021YFC3200204)

作者简介: 常奂宇(1994-), 博士生, 主要从事“水资源-粮食-能源-生态”协同调控研究。E-mail: changhuanYu@126.com

通讯作者: 赵勇(1977-), 教授级工程师, 主要从事自然-社会水循环演变机理与科学调控研究。E-mail: zhaoyong@iwhr.com

针对水-粮-能-生耦合系统失衡带来的问题,国内外对各系统间的耦合关系和如何实现协同可持续发展,开展了系统性和综合性研究。如通过不同的模型或方法,对耦合系统的关键过程或整体进行分析,包括 LEAP^[10]、WEAP^[11]、SWAT^[12]、CGE^[13]、生命周期评价^[14]等;有学者通过建立指标体系,采用耦合协调度及莫兰指数等方法,对复杂系统的协调性和安全性进行评价,并在中国新疆^[15]、陕西^[16]、江苏^[17]、甘肃^[18]等省份进行了应用;也有学者考虑了气候变化、经济贸易和城市化等外部因素对水-粮-能-生耦合系统互馈关系产生的影响,如 Daher 等^[19]基于 WEF Nexus Tool 2.0,考虑了系统本身和外部环境之间的关系;El Gafy 等^[20]建立水-能源-粮食关系系统动态模型,综合考虑人口、人均作物消费量、作物贸易模式、作物产量和气候变化等驱动因素;此外还有 CLEWS 模型^[21],集合了 LEAP 等现有模拟工具;以及 MUSIASEM 模型^[22],基于社会代谢理论分析社会可持续发展状况。

上述国内外研究虽然从不同方面对耦合系统进行了研究,但大多数往往只聚焦水、粮食、能源,忽视了生态和其他三种因素的相互影响效应,且由于水、粮食、能源、生态之间存在复杂的相关关系和联动机制,以往研究主要侧重于对于水-能源、水-粮食两两之间的关系进行研究,对耦合系统缺乏定量计算和整体协同调控,尤其是在系统优化方法和协同建模技术等方面研究不足。因此针对水-粮-能-生系统紧密耦合的特征,本文以京津冀为研究区,提出基于水-粮-能-生关联视角的多水源协同调控方法,通过四个子系统耦合互动关系建立水-粮-能-生耦合系统协同调控模型,为区域水-粮-能-生耦合系统协同保障提供理论技术支持。

2 水-粮-能-生耦合系统协同调控模型构建

2.1 京津冀水-粮-能-生耦合系统构建背景 京津冀是水资源安全保障问题最突出的地区,该地区作为我国重要的粮食、能源消费地,水已经成为制约区域粮食、能源和生态可持续发展的关键要素。根据 2018 年统计资料,京津冀地区水资源自给率为 75%,能源自给率为 18%,粮食自给率为 79%。外调水及粮食、能源贸易伴随的虚拟水大量输入已经对区域水资源、农业和能源生产格局带来显著影响。而根据 2014 年数据测算结果^[23],京津冀地区社会水循环的耗能占当地总耗能的 11.6%,社会水循环耗能已成为制约低碳发展不可忽视的因素之一。因此,在京津冀这样一个水资源、粮食、能源、生态关系紧密耦合,实体水和虚拟水相互结合,社会水循环耗能突出,自然-社会二元水循环特征显著的地区,积极开展水-粮-能-生耦合系统研究,解决经济社会发展伴随的水安全、粮食安全、低碳要求和生态健康保障要求,形成低耗高效、公平可靠的水-粮-能-生耦合系统协同调控技术具有重要意义。

2.2 水-粮-能-生耦合系统关系解析 传统单一系统的水资源优化配置,往往以满足生活、工业、农业和生态的需水为目标,但对于实际的复杂水系统,其水资源配置背后的自然-社会水循环、粮食生产、能源消耗和生态保障之间是动态链接和实时互馈的,如果仅以供需平衡为目标进行水资源优化配置,则无法实现粮食、能源、生态与水资源系统间的耦合关系,也无法协同粮食、能源之间竞争性用水和生态修复问题,因此需要基于水-粮-能-生关联视角开展水资源优化配置。

区域内水资源、粮食、能源和生态系统是紧密耦合又实时互馈的。从物质传递角度出发,自然-社会水循环是整个水-粮-能-生耦合系统最重要的关键过程。通过社会水循环,水资源系统为粮食生产提供灌溉用水,为能源生产提供清洗、冷却等供水,并通过生态补水的方式恢复和维持生态系统健康;粮食在灌溉过程中产生退水,部分粮食通过贸易的方式带来虚拟水流动;社会水循环在取水、供水、用水和排水与污水处理等过程需要消耗大量能源;河湖生态补水能够增加水体蒸发量、地下水位变化影响降雨入渗补给量,进而改变自然水循环过程。此外,粮食、能源、生态之间也存在相互制约和依赖的关系,如粮食和能源的生产过程均会对生态系统带来污染,地下水压采将压缩农业灌溉用水,减少粮食产量,粮食生产、加工过程中需要消耗能源,同时粮食也可以加工制造乙醇等生物质能,通过替代化石燃料的方式实现低碳发展要求。

从协同发展角度出发,水资源优化配置是保障地区水安全、粮食安全、低碳发展、生态健康的关键手段。一方面高效合理的水资源配置为粮食与能源生产和维持生态健康提供安全可靠的水源,另一

方面通过粮食、能源贸易伴随的虚拟水，有效可靠地保障了区域粮食和能源安全。各系统间也通过优化，实现整个耦合系统的动态平衡。如通过调整农业灌溉面积和种植结构，能够在保障本地粮食产量的前提下，降低粮食生产中的用水量；通过优化水资源配置方案，确定合理的供水结构，能够减少社会取水过程的耗能。因此在水-粮-能-生关联视角下开展水资源优化配置，可以实现耦合系统在以水安全、粮食安全、低碳发展路径和生态健康为目标下，进入良性循环，达到整体耦合系统协同发展的效果。水-粮-能-生耦合系统关系如图 1 所示。

2.3 水-粮-能-生协同调控模型架构 水资源通用调控与模拟(GWAS)软件系统，是在 WAS 基础上，集成 QGIS 开源技术、SQLITE 数据库技术等研发的软件产品^[24]，能够较为准确的模拟自然-社会二元水循环过程^[25]，在庆阳市^[26]、北京市^[27]等地区得到了广泛应用。本文基于 GWAS 模型，构建水-粮-能-生协同调控模型，该模型由水循环模块、水资源调配模块、粮食生产模块、能源消耗模块和层次化需水预测模块等 5 大部分组成，其中水循环模块和水资源调配模块基于 GWAS 模型实现，通过对自然-社会水循环进行模拟，统筹调控本地水和外调水，以水安全和生态健康为目标，实现对水资源系统和生态系统的模拟；层次化需水模块为模型提供生活和工业层次化需水数据；粮食生产模块为模型提供农业需水量和粮食安全状况；能源消耗模块计算社会水循环在取水、供水、用水和排水与污水处理等全过程的耗能。模型架构如图 2 所示。

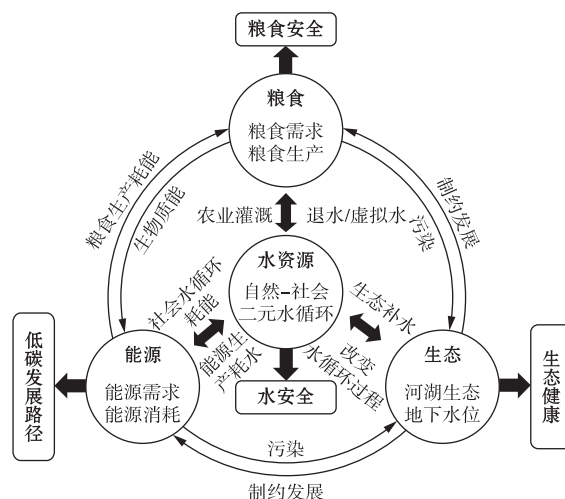


图 1 水-粮-能-生耦合系统关系示意图

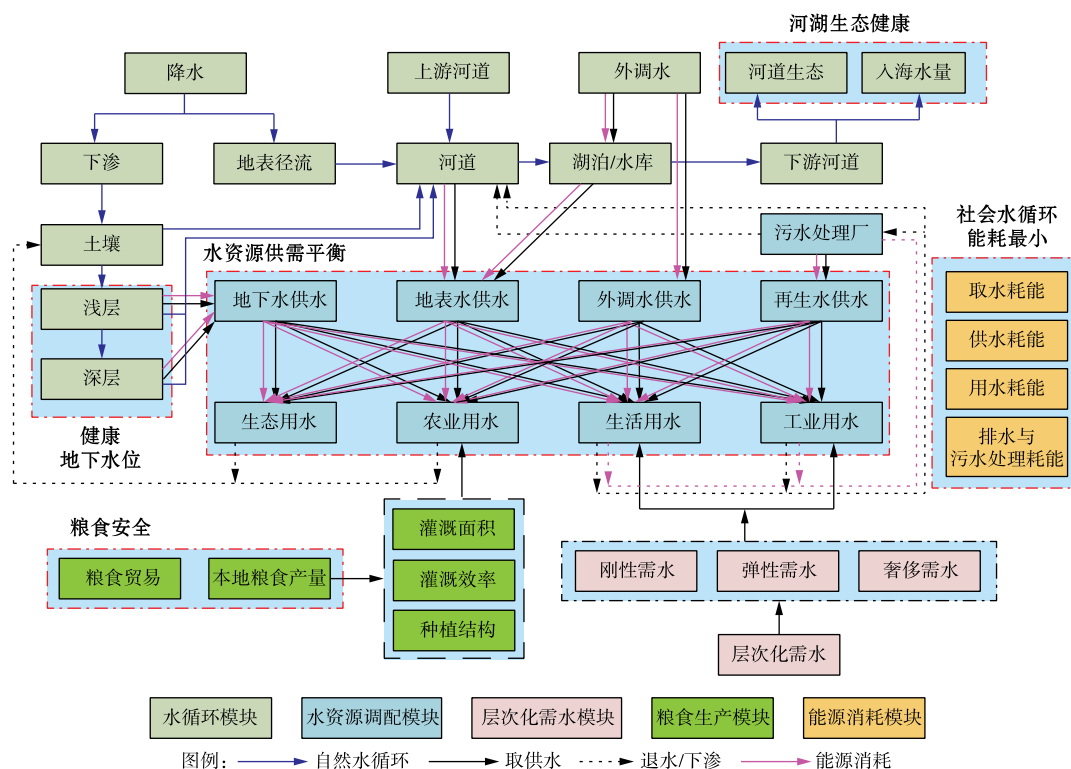


图 2 水-粮-能-生协同调控模型架构图

水-粮-能-生协同调控模型不同模块的基本功能如下：(1)水循环模块：通过降雨产流计算，模拟每个时段的单元产水量、水库/湖泊等水利工程来水量，并计算对应时段上游河道汇水量、河道内取水排水量、外调水工程调入调出量；(2)水资源调配模块：根据不同水源的来水特征和不同用水用户

水特征，实现多水源向多用户水资源配置。生活污水、工业废水全部收集处理，并根据污水处理厂处理能力，一部分废污水提标转化为再生水回用，剩余部分排入河道；(3)层次化需水模块：根据不同行业需水机理和特点，将生活、工业需水分为刚性、弹性和奢侈需水三个层次，其中刚性需水指满足文明生活和良性生产的基本用水，弹性需水指满足经济、社会快速发展所需的水量，奢侈需水指超出合理需求的用水^[28]，为需水层次化调控提供数据支撑；(4)粮食生产模块：基于地区粮食安全要求和粮食自给率保障水平，确定粮食贸易量和本地粮食产量，并通过种植结构、灌溉效率、灌溉面积等确定农业需水量；(5)能源消耗模块：根据不同水源向不同用水户配置情况，计算社会水循环对应的取水、供水、用水、排水与污水处理等全过程的能源消耗量。

由图 2 可知，水-粮-能-生协同调控模型的功能特点主要为：1)水-粮-能-生耦合系统交互核心为自然-社会水循环过程，保障粮食安全的供水、实现健康水循环的生态补水离不开水资源配置，同时社会水循环从自然水循环取水，通过水资源配置后又转化为退排水量进入河道，存在动态互馈的关系，而社会水循环在取水、供水、用水和排水与污水处理全过程均依靠能源进行驱动。2)耦合系统内部本地水和外调水混合、实体水和虚拟水结合，其中外调水调入和调出直接影响区域水资源可利用量情况；粮食贸易伴随的虚拟水引入则加强了水-粮-能-生耦合系统应对水资源短缺风险的能力。3)水-粮-能-生各系统间相互制约，互相联动，如水资源系统通过补水恢复生态系统，带来地下水位回升，从而减少取水耗能。

3 模型主要计算原理

3.1 自然水循环产汇流模拟 自然水循环过程包括降水过程、地表产流过程、壤中流过程、地下径流过程、蒸散发过程与河道汇流过程，该部分采用 GWAS 模型自带的产流模拟模块和河道汇流模块实现，通过该部分模拟，可以为水资源调配模块实时提供水资源量结果，同时输出河道断面生态流量和入海水量等生态系统参数。

3.2 生活工业层次化需水预测 本文将生活和工业需水分为刚性、弹性和奢侈三个层次，以京津冀居民用水行为调查和工业结构与用水效率统计数据为基础，采用概率密度统计方法和基于物理机制的用水行为层次区间，对生活 and 工业采用层次化需水预测方法^[29]。

$$W_dmd_{dom} = W_dom_{rig} + W_dom_{flex} + W_dom_{lux} \quad (1)$$

$$W_dmd_{ind} = W_ind_{rig} + W_ind_{flex} + W_ind_{lux} \quad (2)$$

式中： W_dmd_{dom} 为生活需水； W_dmd_{ind} 为工业需水；rig、flex、lux 分别为刚性、弹性和奢侈需水。

在需水层次化调控时，刚性需水在水源充足条件下全部满足，不参与优化配置；弹性和奢侈需水参与优化配置，其中弹性需水优先保障，在配置后仍有水源富裕条件下，再对奢侈需水进行配置。

3.3 生态需水计算 生态系统需水包括河湖生态需水、健康地下水位保障需水、入海水量约束和河道外生态需水。

(1)河湖生态需水。对于区域不同阶段生态保护与经济社会发展的平衡关系，生态需水可分为最小需水、适宜需水和理想需水，分别对应保障生态系统生物生存和生态环境质量的最小需水量、促进生态系统良性发展的需水量和生态系统发展不受水资源量约束的需水量^[30]。考虑到京津冀地区极度缺水，本文中河湖生态最小需水包括弥补蒸发和渗漏损失水量，和维持水体自净能力的最小需水量，适宜和理想需水相对比最小生态需水，主要体现在更高的水体自净能力和河道两岸绿化带等景观需水。

$$Q = Q_z + Q_s + Q_i + Q_o \quad (3)$$

式中： Q 为生态需水总量； Q_z 为蒸发需水量； Q_s 为渗漏需水量； Q_i 为维持水体自净能力需水量； Q_o 为河道两岸绿化带等景观需水。

(2)健康地下水位。京津冀平原属于强人类活动地区，地下水位恢复和保持目标不仅要考虑自然生态，还需考虑人类活动和社会发展的需求。健康地下水位是以保障生态健康为导向，以地下水获得最大补给为基础，以降低对经济社会发展用水影响为要求，由一系列不同类型地下水位服务功能目标

构成，并随时空变化的复合型健康水位^[31]。恢复健康地下水位需要的生态补水量计算如下：

$$W_dmd_{gdw} = \mu \times A_g \times \Delta h \quad (4)$$

式中： W_dmd_{gdw} 为恢复健康地下水位需水量； μ 为给水度； A_g 为地下水超采区面积； Δh 为健康地下水位与现状水位之差。

(3)入海水量。维持一定规模的入海水量，对于维持河口生态系统平衡、考虑河口冲淤以及防止海水入侵等具有重要意义，考虑到入海水量年际变化较大，因此在实际研究中将多年平均入海水量作为保障健康河口生态的最低入海水量约束。

(4)河道外生态。河道外生态主要包括城市绿化补水和农村人居环境改善等生态需水^[32]，均采用定额法进行预测。

$$W_dmd_{eco} = \sum_{i=1}^2 P_{n,i} \times A_{green,i} \times N_{green,i} \quad (5)$$

式中： W_dmd_{eco} 为河道外生态需水量； $P_{n,1}$ 为城市人口； $P_{n,2}$ 为农村人口； $A_{green,1}$ 为城市人均绿地面积； $A_{green,2}$ 为农村人均绿地面积； $N_{green,1}$ 为城市单位绿地灌溉定额； $N_{green,2}$ 为农村人居环境改善定额。

3.4 农业需水计算 京津冀地区由于粮食无法自给，因此需要通过粮食贸易的方式保障地区粮食安全，而粮食贸易伴随的虚拟水流动一定程度上降低了本地农业需水量。粮食自给率计算公式如式(6)(7)所示，考虑京津冀地区居民消费的主粮主要是以大米、小麦为主的谷物类，因此采用谷物自给率(后面均称粮食自给率)来反映地区粮食自给水平。对于粮食自给率对应的本地粮食产量，基于灌溉水分生产率^[33]计算对应的灌溉用水量，如式(8)所示。

$$Food_{security} = P_n \times N_f = Food_{phy} + Food_{trade} \quad (6)$$

$$p_{food} = Food_{phy} / Food_{security} \quad (7)$$

式中： $Food_{security}$ 为保障地区安全的粮食需求量； N_f 为中国人均粮食需求量； P_n 为本地人口数量； $Food_{phy}$ 为本地粮食产量； $Food_{trade}$ 为粮食贸易量； p_{food} 为粮食自给率。

$$M = \frac{Food_{phy}}{WUE} \quad (8)$$

式中： WUE 为灌溉水分生产率； M 为灌溉用水量。

3.5 水资源调配模拟 水资源调配过程分为取水和供水两个过程，通过地表引水、提水，水库蓄水，地下水提水，再生水厂回用等取水过程，为计算单元提供不同水源可利用水量，按照分质供水原则，基于分水比实现不同水源向不同用水户供水过程，具体计算如下。

$$W_spl_{i,j,u,t} = \min(\beta_{i,j} \times W_dmd_{j,u,t}, W_scap_{i,u,t}, W_resours_{i,u,t}) \quad (9)$$

式中： i 为第*i*种水源； j 为第*j*种用水户； u 为第*u*个计算单元； t 为第*t*个时段； $\beta_{i,j}$ 为分水比，范围为0~1，表示第*i*种水源最大可满足第*j*种用水户的需水比例； $W_dmd_{j,u,t}$ 为*t*时段第*u*个单元第*j*种用水户需水量； $W_scap_{i,u,t}$ 为*t*时段第*u*个单元第*i*种水源供水能力； $W_resours_{i,u,t}$ 为*t*时段第*u*个单元第*i*种水源可利用水量； $W_spl_{i,j,u,t}$ 为*t*时段第*u*个单元第*i*种水源向第*j*种用水户供水量。

3.6 再生水回用 生活、工业污废水将经过城市污水系统完成污废水集中收集处理和再生水回用，对于污废水产生量和再生水可利用量计算公式如下所示。

$$WS = (W_spl_{dom} - WE_{dom}) \times K_{drq} \times K_{drd} + (W_spl_{indu} - WE_{indu}) \times K_{irq} \times K_{ird} \quad (10)$$

$$WR = \min(WS \times K_r, F_{rew}) \quad (11)$$

式中： WS 为污废水处理量； W_spl_{dom} 、 W_spl_{indu} 分别为生活和工业用水量； WE_{dom} 、 WE_{indu} 分别为生活和工业耗水量； K_{drq} 、 K_{irq} 分别为生活和工业污废水收集系数； K_{drd} 、 K_{ird} 分别为生活和工业污废水处理系数； WR 为再生水可利用量； K_r 为再生水处理率； F_{rew} 为再生水处理能力。

污废水收集处理和再生水回用过程水量平衡计算如下。

$$WS = WR + WS_r \quad (12)$$

$$WR = WR_{spl} + WR_r \quad (13)$$

式中： WS_r 为排入所在单元河道中的污废水，该部分污废水水质未提升达到再生水标准； WR_{spl} 为再生

水供水量； WR_r 为排入所在单元河道中的再生水。

3.7 社会水循环耗能计算 社会水循环全过程能源消耗，是指为驱动水资源在社会水循环流通所需消耗的能源，主要包括取水耗能(地表水取水、地下水提水、外调水取水)、供水耗能(水厂制水、海水淡化、输配水)、用水耗能(家庭生活用水、公共用水、工业用水)和排水与污水处理耗能(污废水收集、处理、再生水处理回用)，具体环节如图3所示，计算公式见文献[34]。

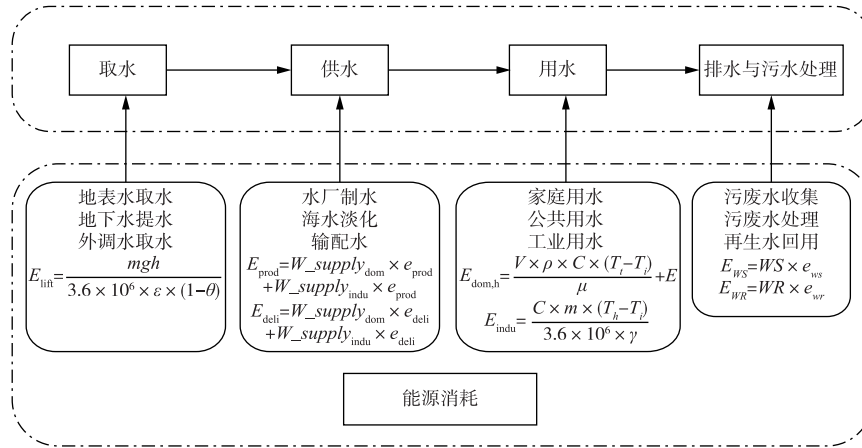


图3 社会水循环能源消耗示意

4 水-粮-能-生协同调控目标与求解方法

水-粮-能-生协同调控目的为实现区域水-粮-能-生耦合系统达到效率最高、公平可靠、可持续利用等多目标，保障水安全、粮食安全、低碳发展路径和生态健康。传统的水资源优化配置方法往往局限于水资源单一系统，难以保障整个水-粮-能-生耦合系统协同调控结果最优，甚至可能因为不同系统间失衡带来生态破坏等问题。本文提出一种基于水-粮-能-生关联视角的多水源协同调控方法，通过耦合水资源系统、粮食系统、能源系统和生态系统，将四者的互馈关系纳入区域水资源协同调控范畴，为区域水-粮-能-生耦合系统可持续利用和协同发展提供理论技术支撑。

4.1 协同发展目标

(1) 水资源系统。水资源系统的保障目标为水安全，通过不同水源向不同用户合理的分配水量，达到缺水量最小和供水公平性最优。

$$\min f_1(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J (D_j^k - \sum_{i=1}^I x_{ij}^k) \quad (14)$$

式中： $f_1(x)$ 为缺水量； D_j^k 为第 k 个单元 j 行业的需水量； x_{ij}^k 为第 k 个单元 i 水源向 j 行业的供水量； I 为区域水源数量； J 为区域行业用水户数量； K 为区域单元数量。

$$\max f_2(xp) = 1 - \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (xp^k - \overline{xp})^2} \quad (15)$$

式中： $f_2(xp)$ 为均衡率，反映了不同单元间缺水率的差异性，均衡率越大表示地区间缺水率差异越小，供水结果更加公平； xp^k 为第 k 个单元的缺水率； \overline{xp} 为区域平均缺水率。

对于水资源系统，其主要约束条件包括：单元水量平衡、单元配置水量不超过工程供水能力、水库水量平衡及运行规则等。

(2) 粮食系统。粮食系统的保障目标为粮食安全，对于京津冀地区，由于粮食无法自给，缺口均通过粮食调进来满足。因此对于粮食系统，通过设定本地粮食自给率，作为一个约束来控制整个区域系统发展。京津冀作为我国北方人口密集区和粮食的消耗区，当粮食自给率低于阈值时，将对整个地区发展带来巨大影响；而由于区域本身水资源自然禀赋较差，粮食生产与经济社会发展和生态保护均

存在一定的用水冲突，因此不设置粮食自给率越高越好的发展目标。

对于粮食系统，主要约束条件包括：本地粮食产量不超过有效灌溉面积约束下最大粮食产量等。

(3)能源系统。能源系统的目标为低碳的发展路径，该部分通过科学合理的优化供水结构，可以减少社会水循环的耗能，达到低碳发展的目标。

$$\min f_3(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \gamma_{ij}^k x_{ij}^k \quad (16)$$

式中： $f_3(x)$ 为社会水循环总耗能； x_{ij}^k 为第 k 个单元 i 水源向 j 行业的供水量； γ_{ij}^k 为第 k 个单元 i 水源向 j 行业供水的单方水耗能。

(4)生态系统。生态系统的目标为健康的水循环模式，京津冀地区生态破坏严重，但地区水资源禀赋有限，因此该部分采用约束的方式控制整个区域系统发展。即河湖生态水量不低于最小生态需水，入海水量不低于最小入海水量要求，地下水开发利用不超过可开采量。

4.2 协同调控方案求解 对于京津冀水-粮-能-生耦合系统，通过对粮食系统设置粮食自给率下限约束和生态系统设置最低生态保障约束，可以实现粮食安全和生态健康的协同发展要求，在此基础上，基于层次化调控思路，以缺水量最小、公平性最优和能源消耗最低为多目标，开展水资源优化调配，进而实现区域水-粮-能-生耦合系统达到效率最高、公平可靠、可持续利用等多目标，实现水资源、经济社会和生态环境协同发展。

水-粮-能-生协同调控方法分为单方案寻优和多情景比选两步：

考虑未来经济社会发展存在多种不同组合情景，对于京津冀水-粮-能-生耦合系统，在每一种确定情景下，均有不同的水资源调控方案对应不同的水-粮-能-生耦合系统发展结果，因此首先要在确定情景下，通过协同优化算法寻找水-粮-能-生协同发展下的最优水资源调控方案，即单方案寻优；

单方案寻优之后，对于未来多种不同组合情景，均是最优水资源调控方案下水-粮-能-生耦合系统协同发展情景。但由于不同情景设置不同，因此不同情景对应水-粮-能-生耦合系统协同发展结果存在优劣差别，此时通过对多情景进行比选，选出未来最优的发展情景，即多情景比选。

(1)单方案寻优。在确定情景下(模型边界固定)，协同优化算法主要步骤为：

步骤 1：以缺水量最低、公平性最优和能源消耗最低为多目标，以粮食自给率、生态保障要求等为目标约束条件，采用在水资源优化配置^[35]和水粮能协同调控^[36]研究中得到广泛应用的 NSGA-II (改进的非支配排序遗传算法^[37])来驱动水-粮-能-生协同调控模型，得到满足不同目标最优 Pareto 前沿的水资源优化配置非劣解集。

步骤 2：将 Pareto 前沿中所有解均输入到水-粮-能-生协同调控模型，计算得到水-粮-能-生四个子系统不同指标结果，不同系统评价代表性指标如表 1 所示。采用 Max-min 标准化法对每个子系统的指标进行规范化处理，利用熵权法确定各指标权重，并通过综合评价函数确定各系统的综合评价结果。

表 1 水-粮-能-生子系统评价指标

系统	指标	类型	系统	指标	类型
水系统	生活用水量	负向指标	粮食系统	农业用水量	正向指标
	生产用水量	负向指标		粮食自给率	正向指标
	供水效益	正向指标		农业效益	正向指标
	缺水率	负向指标		农业缺水率	负向指标
能源系统	取水耗能	负向指标	生态系统	地下水开采量	负向指标
	供水耗能	负向指标		地下水回补量	正向指标
	用水耗能	负向指标		入海水量	正向指标
	排水耗能	负向指标		河道生态水量	正向指标
			河道外生态用水量	正向指标	

Max-min 标准化法:

正向指标:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (17)$$

负向指标:

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (18)$$

式中: x'_{ij} 为 Pareto 前沿中第 i 个解中指标 j 归一化后的标准化值; $\max(x_j)$ 为所有解中 j 指标的最大值; $\min(x_j)$ 为所有解中 j 指标的最小值。

综合评价函数:

$$\begin{cases} F_1(x') = \sum_{j=1}^n a_j x'_{ij} \\ F_2(y') = \sum_{j=1}^m b_j y'_{ij} \\ F_3(z') = \sum_{j=1}^o c_j z'_{ij} \\ F_4(u') = \sum_{j=1}^p d_j u'_{ij} \end{cases} \quad (19)$$

式中: F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 分别为水资源、粮食、能源、生态各子系统的综合评价指标; a_j 、 b_j 、 c_j 、 d_j 为各子系统不同指标的权重; x'_{ij} 、 y'_{ij} 、 z'_{ij} 、 u'_{ij} 为各子系统不同指标的标准化值; n 、 m 、 o 、 p 为各子系统的指标数量。

步骤 3: 基于耦合度公式和水-粮-能-生系统的整体综合评价结果, 可以计算水-粮-能-生系统的耦合协调度 $T^{[38]}$, 通过对比 Pareto 前沿中不同解的耦合协调度值, 确定耦合协调性最高的解为最优的水资源调控方案。

耦合度 C 反映了水-粮-能-生各系统间的耦合协调作用, 计算公式如下:

$$C = \frac{4\sqrt[4]{F_1 \times F_2 \times F_3 \times F_4}}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4} \quad (20)$$

整体综合评价结果 D 是基于综合评价函数, 对水-粮-能-生四个系统进行算数平均得到总的综合评价得分, 计算公式如下:

$$D = \frac{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}{4} \quad (21)$$

耦合协调度 T 同时考虑了各系统间的耦合性和系统整体的协调情况, 计算公式如下:

$$T = \sqrt{C \times D} \quad (22)$$

(2) 多情景比选。未来发展对应着多种不确定的情景, 如不同的经济发展速度、更高的生态保障目标以及可能新增的外调水源, 对于每一种情景, 都有符合水-粮-能-生协同发展的最优水资源调配方案, 但对于不同的情景, 如何评价对应水-粮-能-生耦合系统协同发展结果的优劣, 对于未来发展决策和水资源精细化管理具有重要意义。本文借鉴 Loucks 提出的水资源持续性指标 (Sustainability Index, SI) 构建方法^[39], 针对水-粮-能-生耦合系统协同发展目标, 通过设计协同性、可靠性和公平性 3 个性能指标, 构建了可以总体量化系统可持续性新指标, 综合协同指数 (Comprehensive Sustainability Index, CSI)。

协同性指标 T 的计算公式见式 (22), 该指标反映了水-粮-能-生耦合系统协调发展的程度。

可靠性指标 R 的计算公式如下, 该指标反映了整个系统安全保障程度, 指标越大表明整个系统的可靠性越高, 抵御风险能力越强, 当 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 全部为 1 时, R 将取到最大值 1, 表明水-粮-能-

生耦合系统能完全满足自给要求。

$$R = \sqrt[4]{R_1 \times R_2 \times R_3 \times R_4} \quad (23)$$

$$R_1 = \min\left(1, \frac{W_r}{W_{use}}\right); R_2 = \min\left(1, \frac{F_{pro}}{F_{safe}}\right); R_3 = \min\left(1, \frac{E_p}{E_{use}}\right); R_4 = \min\left(1, \frac{H_{supply}}{H_{need}}\right); \quad (24)$$

式中： W_{use} 为用水量； W_r 为本地可供水量； F_{pro} 为本地粮食产量； F_{safe} 为粮食需求量； E_{use} 为能源使用量； E_p 为本地能源生产量（考虑京津冀能源基本依赖外部输入，因此具体计算时可采用典型年的能源使用量代替，超过该典型年的能源使用量视为不可可持续发展的行为）； H_{supply} 为生态用水量； H_{need} 为生态需水量。

公平性指标 E 通过均衡率反映，计算公式如下。在水-粮-能-生各个子系统协同发展的同时，每个计算单元间缺水率应不存在较大差异，该指标越大表明各计算单元间缺水率没有显著差异，整个系统较为公平、均衡。

$$E = f_2(xp) \quad (25)$$

由于协同性、可靠性和公平性 3 个性能指标均为正向指标，因此在多方案比选的时候，对这三个指标采用几何平均处理，得到综合协同指数，如下所示：

$$CSI = \sqrt[3]{T \times R \times E} \quad (26)$$

CSI 可以用于识别不同情景水-粮-能-生耦合系统协同发展结果的差异， CSI 越高代表对应情景下耦合系统可靠性越强，协同发展程度越好，在多情景比选时，应选择 CSI 最好的情景作为未来发展推荐的理想情景。

5 结论

在水-粮-能-生耦合系统中，水、粮食、能源、生态四者之间存在复杂的相关关系和联动机制，任一子系统内部要素的供求变化均会给其他子系统带来影响，因此在耦合系统定量计算和整体协同调控等研究方面仍存在诸多不足。本文以京津冀为研究区，解析了水-粮-能-生子系统间的耦合关系，构建了以自然-社会水循环过程为核心的协同调控模型架构，通过改进 GWAS 模型中的水资源调配模块，添加粮食生产、能源消耗和层次化需水预测模块，建立了可以实现各子系统关键要素传递和动态互馈模拟的水-粮-能-生协同调控模型。同时，通过构建水安全、粮食安全、低碳发展、生态健康的协同发展目标，将水-粮-能-生四者间的互馈关系纳入区域多水源协同调控范畴，基于 NSGA-II 和耦合协调度提出协同优化算法进行单方案寻优，并采用综合协同指数进行多情景比选寻优，提出了基于水-粮-能-生关联视角的多水源协同调控方法。研究提出的协同调控模型架构、计算原理和优化求解等方法，可为区域水-粮-能-生耦合系统可持续和协同发展研究提供理论与技术支撑。

参 考 文 献：

- [1] CHANG Y, LI G J, YAO Z, et al. Quantifying the water-energy-food nexus: current status and trends[J]. Energies. 2016, 2(9): 65-82.
- [2] National Intelligence Council. Global Trends 2030: Alternative Worlds[M]. Center for the Study of Intelligence, 2013.
- [3] 施海洋, 罗格平, 郑宏伟, 等. 基于“水-能源-食物-生态”纽带因果关系和贝叶斯网络的锡尔河流域用水分析[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 1036-1052.
- [4] DOGAN M S, FEFER M A, HERMAN J, et al. An open-source Python implementation of California's hydro-economic optimization model[J]. Environmental Modelling and Software, 2018, 108(10): 8-13.
- [5] ESCRIVA-BOU A, HUI R, MAPLES S, et al. Planning for groundwater sustainability accounting for uncertainty and costs: An application to California's Central Valley[J]. Journal of Environmental Management, 2020,

- 264; 110426.
- [6] MEDELLÍN - AZUARA J, MACEWAN D, HOWITT R E, et al. Hydro - economic analysis of groundwater pumping for irrigated agriculture in California's Central Valley, USA[J]. Hydrogeology Journal, 2015, 23(6): 1205-1216.
- [7] HENRIQUE D, MAURO D, LUZ S, et al. Foresight for corn-to-ethanol mills in the Southern Brazilian Amazon: Energy, economic and environmental analysis[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(6): 106740.
- [8] YUE D, YOU F, SNYDER S. Biomass - to - bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges[J]. Computers & Chemical Engineering, 2014, 66(4): 36-56.
- [9] NAMANY S, AL - ANSARI T, GOVINDAN R. Optimisation of the energy, water, and food nexus for food security scenarios[J]. Computers & Chemical Engineering, 2019, 129: 106513
- [10] AGRAWAL N, AHIDUZZAMAN M, KUMAR A. The development of an integrated model for the assessment of water and GHG footprints for the Power generation sector[J]. Applied Energy, 2018, 216: 558-575.
- [11] GUAN X, MASCARO G, SAMPSON D, et al. A metropolitan scale water management analysis of the food - energy - water nexus[J]. Science of The Total Environment, 2020, 701: 134478.
- [12] ZHANG X, REN L. Simulating and assessing the effects of seasonal fallow schemes on the water - food - energy nexus in a shallow groundwater - Fed plain of the Haihe River basin of China[J]. Journal of Hydrology, 2021, 595(4): 125992.
- [13] GE J P, LEI Y L. Policy options for non - grain bioethanol in China: Insights from an economy - energy - environment CGE model[J]. Energy Policy, 2017, 105(6): 502-511
- [14] LAURENTIS V, HUNT D, ROGERS C. Overcoming food security challenges within an Energy/Water/Food Nexus (EWFN) approach[J]. Sustainability, 2016, 8(1): 95.
- [15] 王玉宝, 蒲傲婷, 闫星, 等. 新疆水 - 能源 - 粮食系统安全综合评价[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 264-272.
- [16] 方兰, 魏倩倩. 陕西省水资源与能源系统耦合协调发展分析[J]. 水利发展研究, 2019, 19(1): 43-47.
- [17] 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.
- [18] 党锐, 张军, 周冬梅, 等. 2000-2016年甘肃省水资源 - 能源 - 粮食耦合协调特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(1): 115-123.
- [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] GAFY I, GRIGG N, REAGAN W. Dynamic behaviour of the Water - Food - Energy Nexus: focus on crop production and consumption[J]. Irrigation and Drainage, 2017, 66(1): 19-33.
- [21] MARK H, SEBASTIAN H, MANUEL W, et al. Integrated analysis of climate change, land - use, energy and water strategies[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(7): 621-626.
- [22] GIAMPIETRO M, MAYUMI K. Multiple - scale integrated assessment of societal metabolism: introducing the approach[J]. Population and Environment, 2000, 22(2): 109-153.
- [23] 朱永霞. 社会水循环全过程能耗评价方法研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017.
- [24] 桑学锋, 王浩, 王建华, 等. 水资源综合模拟与调配模型 WAS(I): 模型原理与构建[J]. 水利学报, 2018, 49(12): 1451-1459.
- [25] 常奂宇. WAS 模型研发改进与京津冀水资源配置应用[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- [26] 桑学锋, 赵勇, 翟正丽, 等. 水资源综合模拟与调配模型 WAS(II): 应用[J]. 水利学报, 2019, 50(2): 201-208.
- [27] 曹永强, 李玲慧. 基于水资源综合模拟与调配一体化模型的北京市水资源模拟分析[J]. 水利水电科技进步, 2021, 41(6): 25-31.
- [28] 侯保灯, 肖伟华, 赵勇, 等. 水资源层次化需求计算与合理配置[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [29] 赵勇, 王丽珍, 王浩, 等. 城镇居民生活刚性、弹性、奢侈用水层次评价方法与应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(6): 1316-1325.

- [30] ZHANG C, WAN Z, JING Z, et al. Calculation of ecological water requirements of urban rivers using a hydrological model: A case study of Beiyun River[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262(2/4): 121368.
- [31] 刘蓉. 含水层系统压缩释水对地下水循环参数和给水能力影响研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- [32] 王雪梅. 南水北调河北省受水区需水预测与水资源配置研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015.
- [33] 郑捷, 李光永, 韩振中. 中美主要农作物灌溉水分生产率分析[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(11): 46-50.
- [34] 何国华, 姜珊, 赵勇, 等. 我国现状能源与水纽带关系定量识别[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(4): 54-70.
- [35] 李琳, 吴鑫森, 郗志红. 基于改进 NSGA-II 算法的水资源优化配置研究[J]. *水电能源科学*, 2015, 33(4): 34-37.
- [36] ZHOU Y, CHANG L, UEN T, et al. Prospect for small-hydropower installation settled upon optimal water allocation: An action to stimulate synergies of water-food-energy nexus[J]. *Applied Energy*, 2019, 238: 668-682.
- [37] WANG L, NG A, DEB K. Multi-objective Evolutionary Optimisation for Product Design and Manufacturing[M]. Springer London, 2011.
- [38] 张洪芬, 曾静静, 曲建升, 等. 资源高强度流动区水、能源和粮食耦合协调发展研究——以京津冀地区为例[J]. *中国农村水利水电*, 2019, 439(5): 22-26, 33.
- [39] SANDOVAL-SOLIS S, MCKINNEY D C, LOUCKS D P. Sustainability index for water resources planning and management[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2011, 137(5): 381-390.

Research on the coordinated regulation of water resources-food-energy-ecology in Beijing-Tianjin-Hebei Region I: Methods and Model

CHANG Huanyu^{1,2}, ZHAO Yong¹, SANG Xuefeng¹, LI Haihong¹, HE Fan¹, ZHAI Jiaqi¹

(1. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of*

Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. *Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100038, China)*

Abstract: The Beijing-Tianjin-Hebei region is an important food and energy consumption area in China, but water resources have become a key factor restricting the sustainable development of regional food, energy and ecology. In order to optimize the relationship between the water-food-energy-ecology system and realize the coordinated regulation of multiple water sources from the perspective of water-food-energy-ecology, based on GWAS model, this study modified the water resource allocation module, added the food production module, energy consumption module and hierarchical water demand prediction module, and constructed the water-food-energy-ecology coordinated regulation model to realize the transfer and mutual feed of key elements of each system. According to the characteristics of the Beijing-Tianjin-Hebei region water-food-energy-ecology system, a coordinated development goal of ensuring water security, food security, low-carbon development path and ecological health is established, and a collaborative optimization algorithm based on NSGA-II and coupling coordination degree and comprehensive sustainability index were proposed to realize the optimization solution of the coordinated regulation scheme of water-food-energy-ecology system.

Keywords: Jing-Jin-Ji; water-food-energy-ecology; coordinated regulation; GWAS; comprehensive sustainability index

(责任编辑: 于福亮)