

农业用地优化决策的食品-能源-水关联评价方法

聂亚玲¹, 肖炘^{1*}, 曾玉娇¹, 朱闽¹, 陆冬云¹, 李杰²

1. 中国科学院过程工程研究所, 北京 100190

2. 英国曼彻斯特大学化工与分析科学系过程集成中心, 曼彻斯特, 英国 M13 9PL

摘要 农业用地系统优化决策旨在通过统筹食品-能源-水(FEW)和用地资源、经济投入以及环境可持续发展问题,在满足生产需求的基础上,实现节能增效等多个优化目标。目前,以FEW全生产要素为主开展实际食品-能源-水关联(FEW-N)的农业用地系统研究,尚缺乏能够全面量化评估不同决策影响的系统性评估指标。针对此现状,从资源合理利用角度出发,在中国山东省选择相关区域为典型研究对象,开展农业用地系统多目标优化和评估研究,以实现资源利用效率最大化和投入产出比最高为系统目标,提出一套系统多目标优化方法和综合评估指标,以实现用地和FEW资源配置的系统折衷最优。研究结果显示,以双线性整合方式为基础构建的FEW-N综合度量指标不仅能够高效求解多目标优化问题,获得系统折衷最优的用地和资源配置方案,还可以通过可视化方式对不同方案进行量化评估,提供决策依据。

关键词 用地优化决策;食品-能源-水关联;多目标优化;综合度量指标

农业用地是为人类提供食品的最大生态系统^[1]。该系统在生产过程中消耗了全球约30%的能源、92%的水资源,并产生了超过20%的温室气体排放^[2-3]。据联合国粮食及农业组织估计,到2050年,预计全球人口将达97亿^[4],相比于2005年,人类

对食品需求增加60%,这需要额外增加7000万ha耕地才能满足粮食生产需求,但由于环境问题的影响,届时增加农业用地对满足食品需求的贡献率将由14%降至10%^[2,5-6]。到2035年,能源消耗量将比2011年增加1/3^[7]。据联合国环境规划署统计,目

收稿日期:2019-11-30;修回日期:2020-03-28

基金项目:中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-EW-STS-054-3)

作者简介:聂亚玲,助理研究员,研究方向为过程建模与优化,电子信箱:ylne@ipe.ac.cn;肖炘(通信作者),研究员,研究方向为化工过程全局优化,电子信箱:xxiao@ipe.ac.cn

引用格式:聂亚玲,肖炘,曾玉娇,等. 农业用地优化决策的食品-能源-水关联评价方法[J]. 科技导报, 2020, 38(11): 78-88; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.11.009

前全球约有 21 亿人无法获得安全用水^[8],到 2050 年,全球约有 50% 人类生活将面临缺水威胁^[9]。

中国是农业大国,用仅占全球 7% 的耕地养活近 20% 的人口,由于城镇化进程加快,土地利用问题形势严峻,在以土地为核心的农业用地系统中,食品、能源和水(food-energy-water, FEW)三者的供应和需求之间的矛盾也十分严峻。据统计,目前中国谷类粮食(小麦、大米和玉米)自给率超过 95%,但约 80% 的豆类粮食依靠进口。近 30 年间,中国化肥使用量增加 3 倍,化肥利用率为 37.8%,低于 55% 的世界平均值,单位耕地面积化肥投放量是美国的 1.7 倍,灌溉用水消耗了 60% 的可用水资源,用水效率为 30%~40%,而发达国家约为 70%~80%。从 1978 到 2014 年,中国能源消耗量增加了 6.5 倍,预计从 2015 年到 2035 年能源消费量将增加 47%,2014 年中国总用水量在水资源可利用量中占比已超过 20% 的警戒线^[10]。长期低效大量使用化肥和开采水资源,已经导致了严重的耕地质量下降问题、水资源短缺问题和环境污染问题^[11]。此类问题在中国传统农业生产地区,如山东省尤为显著。因此,从全球到国家再到典型农业生产地区范围内,对土地和 FEW 等有限资源的需求竞争将对现有的农业用地系统造成巨大的压力。

农业用地系统的核心问题是用地优化(land use optimization, LUO)问题。LUO 问题是指在一定土地范围内通过将特定地块赋予不同用途(工业用地、农业用地、公共用地等)的过程使得该区域内用地效率最大^[12]。农业用地系统以农业用地为核心,在生产食品的同时,消耗了大量的能源和水资源,同时不同的生产对象之间也存在用地竞争。对于限定区域的农业用地系统,用以满足人类需求和可持续发展目标的系统用地分配决策受到 FEW 资源的供应约束。对农业用地系统进行用地优化研究必然涉及对与之相关的 FEW 资源最优分配决策。同时,系统中 FEW 三大要素相互依赖,相互作用,形成复杂的相互作用网络,称之为食品-能源-水关联(food-energy-water nexus, FEW-N)^[13]。因此,对农业用地系统的任何决策或评估都应考虑 FEW

以及它们之间的相互关联作用对整个系统决策带来的影响^[14]。

为了获得用地系统中有关用地和 FEW 资源的无偏决策和量化 FEW-N 相互作用,当前 FEW-N 研究的方法通常涉及对土地利用单元的数据驱动建模,对特定技术或产品的生命周期分析,以及描述性的系统定性分析^[15]。这些方法可为 FEW-N 系统的量化决策提供模型和必要的分析方法,但对于如何统筹 FEW 和用地资源、经济投入以及环境可持续发展问题,获得系统折衷最优方案上,仍然面临重大挑战。FEW-N 农业用地系统通常会面临满足生产需求、提高经济效益和减少生态环境压力等多种决策冲突,这些冲突决定 FEW-N 农业用地系统优化往往是一个多目标优化(multi-objective optimization, MOO)问题。已有研究表明^[16-17],一些多目标优化技术,例如 ε 约束方法^[18],能够用于具有确定边界的 FEW 系统的优化决策,并有效达到最优折衷方案,但对于包含大量不确定性和复杂 FEW-N 的农业用地系统,此类方法并不适用。由于 MOO 问题的复杂性,通常很难有效获得其唯一最优解。然而,实际的决策问题往往需要唯一的实施策略,如 FEW-N 农业用地系统用地的分配和资源的优化调度最终只能选择唯一的方案进行决策。因此,还需要一套通用的客观评价指标对不同的优化方案进行评估,以便决策者做出最终决策。目前的研究多依赖于主观判断设定的标准^[19],往往存在非技术性、不准确、高度主观性等局限性^[20],尚缺乏一套能够全面量化评估不同决策影响的系统性评估指标。

基于这种现状,本研究从资源合理利用角度出发,选择中国山东地区为典型研究案例,针对农业用地系统的多目标优化和评估问题,以实现资源利用效率最大化和投入产出比最高的系统目标,提出一套系统多目标优化方法和综合评估指标,以实现用地和 FEW 资源配置的系统折衷最优。该方法可为实现农业用地的系统性优化提供一套通用的方法基础和综合评估指标体系,对实际生产决策具有重要指导意义。

1 研究区域概况及数据来源

本案例中采用的研究区域位于中国山东省禹城市的中国科学院禹城综合试验站(36.49°N, 116.34°E), 所在地区属于暖温带半湿润季风气候区, 年平均气温 13.1℃, 年均降雨量 593.2 mm, 主要集中在 7—9 月^[21]。该地区在历史上干旱、盐碱等自然灾害频繁, 生态环境较脆弱, 但生产潜力较大, 属黄淮海平原地区的代表性地貌类型。禹城站自 1979 年建站以来, 对该地区农田生态系统的水、土壤、大气和生物环境等多方面进行了长期定位监测, 获得大量数据。在生产单元的构建方面, 本案例的种养对象为该地区的典型作物(小麦、玉米、棉花等)和动物(牛、猪、鸡等)。在用地系统的构建方面, 应综合考虑该地区和中国农业生产的一些重点关注问题和典型特征, 如食品高度需求、水资源短缺、化肥过度使用、水体和土壤污染等^[22]。总之, 该 FEW-N 农业用地系统的构建和优化决策问题的求

解应结合当地历史环境、数据、典型特征、重点关注目标等多个方面综合考虑。

综合以上地区概况, 本案例选取的用以构建用地系统的作物、动物生产用地单元及其相应的用地和生产情况如表 1 所示。具体的, 本案例涉及的用地系统为作物-动物用地系统, 其中作物生产对象包括小麦和玉米生产单元组成的轮作子系统, 棉花经济作物生产单元, 动物生产对象包括奶牛、产蛋鸡(高产和低产两种类型)和生猪生产单元。本系统中的生产用地单元, 即为不同生产单元对应的用地面积, 例如, 10 ha 的小麦生产用地即为 1 个作物用地单元, 25 头奶牛用地即为 1 个动物用地单元。所采集的相关数据主要包括气象数据、生产相关 FEW 数据、经济成本数据等 3 大方面。其中气象数据来自禹城实验站 2000—2015 年包括日照、降雨、温度、蒸发量等在内的记录, 该数据可用于训练作物生产单元模型。

表 1 作物-动物用地系统中生产单元属性

生产对象	生产单元	用地单元规模	用地类型	产物	副产物
作物 1	小麦	10 ha	轮作作物用地	小麦	秸秆
作物 2	玉米	10 ha	轮作作物用地	玉米	秸秆
作物 3	棉花	10 ha	作物用地	棉花	秸秆
动物 1	奶牛	25 头	动物用地	牛奶	粪肥
动物 2	产蛋鸡	2500 只	动物用地	鸡蛋、鸡肉	粪肥
动物 3	生猪	40 头	动物用地	猪肉	粪肥

2 FEW-N 评价指标体系

2.1 多目标用地优化方法框架

图 1 简述了用地优化问题定义、求解目标和基本求解方法框架。本研究中, 求解用地优化问题旨在降低不同土地资源之间的竞争压力, 同时最大化利润, 并平衡不同利益相关方之间的利益冲突。

系统的求解方法体系包括 3 大步骤^[23]。

步骤 1: FEW-N 农业用地系统定义。该步骤通过针对本案例涉及生产单元进行用地问题定义, 并基于超结构模型对体系进行构建, 从而达到识别该用地系统的主要特征, 并为之后的建模和优化步骤

提供一个基础全局设计。图 2 列出了考虑 3 种作物和 3 种动物生产单元的用地系统的超结构模型设计。该超结构模型刻画了系统从输入到输出的各个环节, 包括 FEW 资源输入、生产单元、用地网格、输出产品和副产品、应用技术、产品或废弃物的循环利用途径, 以及用以连接这些环节的 FEW 定量关系。值得注意的是, 在本案例的 FEW-N 用地系统中, 涉及的能源消耗为化肥和动力用能(农用机械、柴油、照明等用能), 不包括能源生产。该超结构设计模型与前期研究^[24]中对应的模型相比, 在粮食饲料循环回路、有机肥料处理技术回路上有所区别。

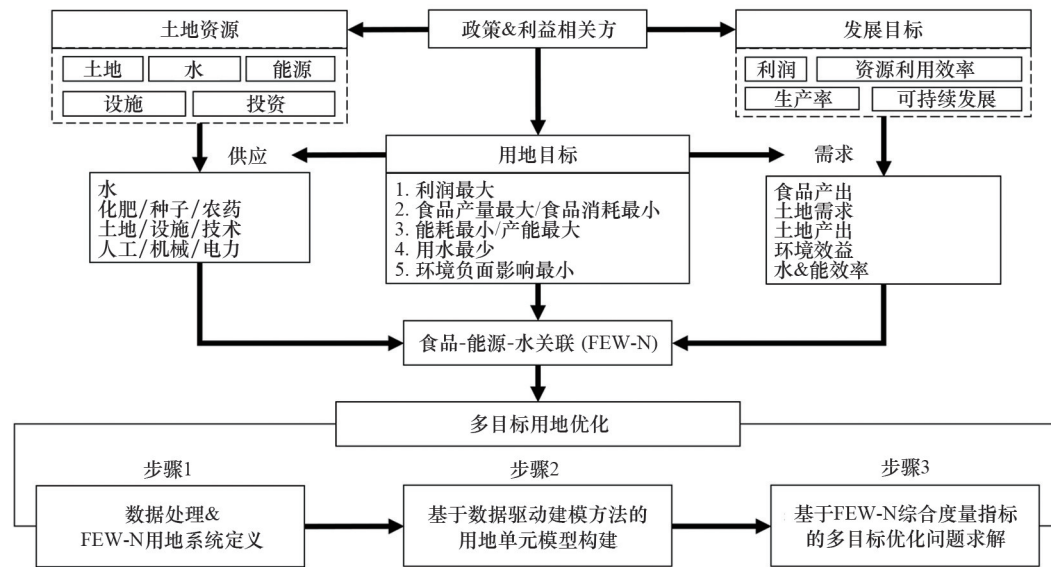
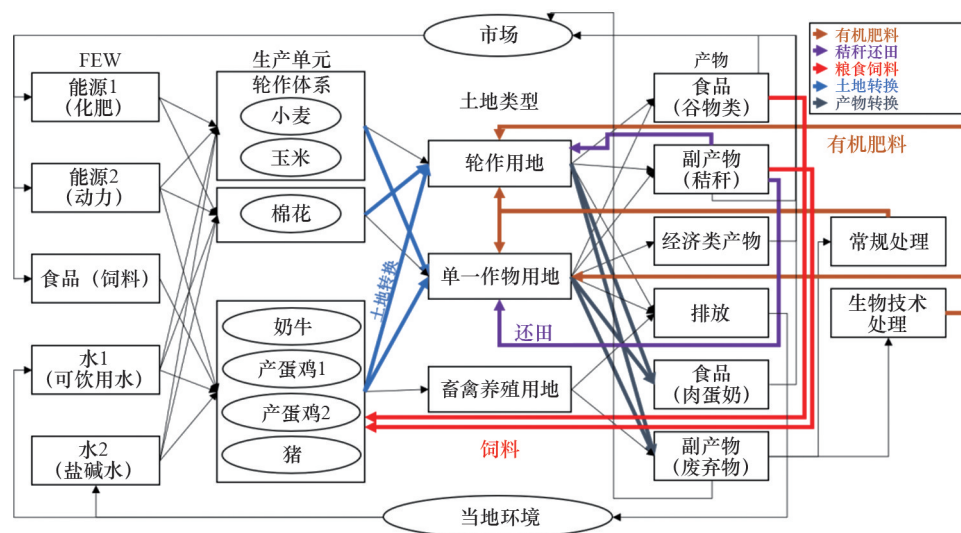
图1 多目标用地优化问题求解方法框架^[23]

图2 FEW-N用地系统超结构设计

步骤2:生产单元建模。该步骤基于数据驱动建模方法对构成步骤1超结构模型内各个作物和动物生产单元的生产过程进行模拟,并量化系统内的各种FEW-N关联。建模过程主要包括:构建不同条件下输入-输出FEW数据集;基于构建的条件数据集,构建生产单元代理模型并进行参数估计;利用自适应迭代抽样方法改进代理模型精度。本步骤最终可获得作物和动物生产单元的输入-输出模型 F_i 和 F_o ,模型的数学形式和最优参数已在

先前研究中列出^[24]。

步骤3:基于FEW-N综合度量指标求解多目标优化问题。该步骤基于本案例实际的利益相关方的不同需求,定义系统多目标优化决策问题,并通过FEW-N综合度量指标,结合前述超结构模型、生产单元模型和相关FEW-N量化数据,对该问题进行优化求解和决策评估。

以上3步方法框架的具体细节已有研究详述^[23-24],本研究重点讨论FEW-N指标体系的构建,

以及不同 FEW-N 综合度量指标对该多目标优化问题求解方案的影响,旨在探讨适用于此类 FEW-N 用地系统优化决策问题求解和评估的一套通用度量指标。

2.2 FEW-N 指标体系构成

图3概述了包含综合度量指标的 FEW-N 指标体系的构成。针对 FEW-N 农业用地系统,考虑到

各方利益相关者的不同关切点和系统的 FEW 属性可定义为食品(F)、能源(E)、水(W)、经济效益(P),以及环境(En)5大目标维度。因此,与之对应的可分别设立5大优化目标指标:粮食总产量(TF)、能源总消耗量(TE)、系统用水总量(TW)、系统总利润(TP),以及环境罚值(TEn)。

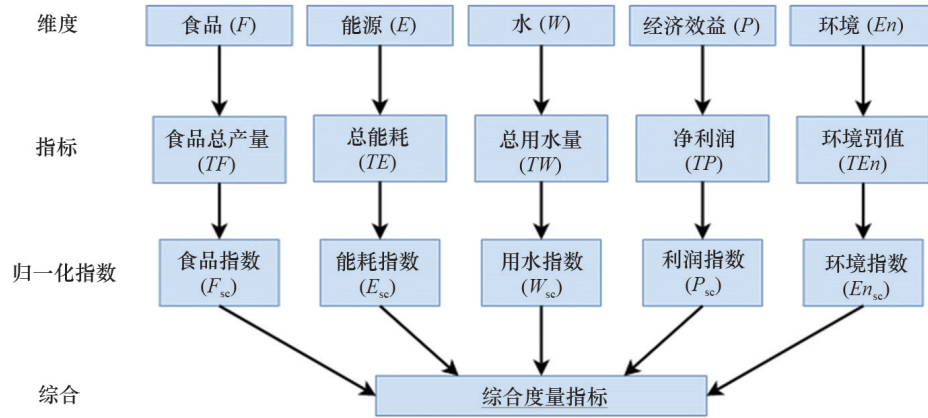


图3 FEW-N 综合度量指标体系

其数学表达式为^[24]

$$\begin{aligned}
 \max \quad & TF = \sum_{c \in C} \sum_{a \in A} F_{ca} + \sum_{l \in L} \sum_{b \in B} F_{lb} - \sum_{b \in B} F'_{lb} \\
 \min \quad & TE = \sum_{c \in C} \sum_{a \in A} (E_{ca} - E'_{ca}) + \sum_{l \in L} \sum_{b \in B} (E_{lb} - E'_{lb}) \\
 \min \quad & TW = \sum_{c \in C} \sum_{a \in A} W_{ca} + \sum_{l \in L} \sum_{b \in B} W_{lb} \\
 \max \quad & TP = \sum_{c \in C} \sum_{a \in A} (p_c F_{ca} - TC_{ca}) + \sum_{l \in L} \sum_{b \in B} (p_l F_{lb} - TC_{lb}) \\
 \min \quad & TEn = \sum_{c \in C} \sum_{a \in A} En_{ca} + \sum_{l \in L} \sum_{b \in B} En_{lb} \\
 s.t. \quad & TF \geq TF^{lo} \\
 & TW^{lo} \leq TW \leq TW^{up} \\
 & TE^{lo} \leq TE \leq TE^{up} \\
 & y^r \in \{0, 1\}; r \in R
 \end{aligned} \quad (1)$$

式中,约束条件主要包括食品、能源、水等资源供应的边界条件(上界:up,下界:lo),用于决策用地分配、生产单元选择、资源分配、技术选择的二元变量(y^r)等。

考虑到不同的优化目标对应的量化指标一般

处于不同数量级尺度,无法直接对多目标同时进行优化对比,因此各量化指标还需要进行归一化处理,从而获得相应的位于同一取值范围(0到1之间)的归一化指数(F_{sc} 、 E_{sc} 、 W_{sc} 、 P_{sc} 、 En_{sc}),其数学表达式为^[24]

$$\begin{aligned}
 F_{sc} &= \frac{TF - TF_{min}}{TF_{max} - TF_{min}} \\
 E_{sc} &= 1 - \frac{TE - TE_{min}}{TE_{max} - TE_{min}} \\
 W_{sc} &= 1 - \frac{TW - TW_{min}}{TW_{max} - TW_{min}} \\
 P_{sc} &= \frac{TP - TP_{min}}{TP_{max} - TP_{min}} \\
 En_{sc} &= 1 - \frac{TEn - TEn_{min}}{TEn_{max} - TEn_{min}}
 \end{aligned} \quad (2)$$

式中,每个指数趋向1时,系统在该维度的表现趋向更优。

以目标的归一化指数 F_{sc} 为例, TF 实质是系统对应优化目标粮食总产量的量化表达形式。作为目标指标的极值, TF_{min} 和 TF_{max} 定义了该指标的

边界,它们的值可以根据经验指定,也可通过优化计算实现动态求解。通过计算 TF 与其边界的归一化距离评估系统在该目标维度的表现。当目标指标的边界可变时,也在一定程度上避免了主观决定目标指标边界的方式对最终决策造成较大偏差的影响。

通过将系统目标转化成可量化指标,再将量化指标转化成归一化指数的方式,可将难以度量的多个目标转换成可在同一数值尺度(0到1之间)内折衷比对的数值目标,为下一步基于这些指数构建综合度量指标,及进一步求解和评估多目标优化问题提供数值基础。

2.3 FEW-N综合度量指标方法

在将多目标转化为对应的归一化指数形式之后,本研究设计了一套 FEW-N 综合度量指标 (FEW-N metric),用于整合多目标对应的归一化指数,从而将包含多个最大值和最小值问题的多目标优化问题转化为对 FEW-N 综合度量指标最大值的单目标优化问题进行求解,以获得同时考虑5个维度的折衷最优方案,这套指标还可直接从5个维度对优化方案进行综合评估,为决策者提供可视化和量化决策依据。

FEW-N 综合度量指标的通用数学表达式为

$$SA^r = \frac{\text{Comb}(S_{sc}, r)}{C_n^r} \quad (3)$$

式中, n 为食品、能源、水、利益、环境对应的所有归一化指数的个数, r 为从 n 个归一化指数中挑选的指数个数, SA^r 为 r 阶综合度量评价指标, S_{sc} 为归一化指数集合, $\text{Comb}(S_{sc}, r)$ 为所有指数的 r^{th} 阶组合。

根据这种通用整合方式,讨论了随着阶数增加获得的不同 FEW-N 综合度量评价指标的特性及其对最终折衷最优方案的影响。当 $r=1$ 到 3 时, SA^r 可展开为以下表达式

$$LA = \frac{F_{sc} + E_{sc} + W_{sc} + P_{sc} + En_{sc}}{5} \quad (4)$$

$$BA = \frac{1}{10} (F_{sc} E_{sc} + F_{sc} W_{sc} + F_{sc} En_{sc} + E_{sc} W_{sc} + E_{sc} En_{sc} + E_{sc} P_{sc} + W_{sc} En_{sc} + W_{sc} P_{sc} + En_{sc} P_{sc} + P_{sc} F_{sc}) \quad (5)$$

$$TA = \frac{1}{10} (F_{sc} E_{sc} W_{sc} + F_{sc} E_{sc} En_{sc} + F_{sc} E_{sc} P_{sc} + F_{sc} W_{sc} En_{sc} + F_{sc} W_{sc} P_{sc} + F_{sc} En_{sc} P_{sc} + E_{sc} W_{sc} En_{sc} + E_{sc} W_{sc} P_{sc} + E_{sc} En_{sc} P_{sc} + W_{sc} En_{sc} P_{sc}) \quad (6)$$

式中,当 $r=1$ 时,FEW-N 综合度量指标是通过求各归一化指数的线性平均值 (linear average, LA) 获得;当 $r=2$ 时,FEW-N 综合度量指标为各归一化指数的双线性平均值 (bilinear average, BA);当 $r=3$ 时,FEW-N 综合度量指标为各归一化指数的三线平均值 (trilinear average, TA)。

同时考虑引入高阶度量指标的简化表达式

$$GA = \frac{1}{2} (F_{sc} E_{sc} + E_{sc} W_{sc} + W_{sc} En_{sc} + En_{sc} P_{sc} + P_{sc} F_{sc}) \sin 72^\circ \quad (7)$$

式(7)实质是一种双线性平均值的简化形式,同时该指标也具有几何意义,可称之为几何平均值 (geometric average, GA)。

如图4所示,5个目标维度对应的归一化指数均从相同的中心点开始,生成了5条轴,以等角等距的方式径向排列,相邻的轴通过网格线连接,组成了一个五边形。每个归一化指数相连形成的阴影面积即为式(7)的数学表达式。因此,指标 GA 不仅能够用于多目标优化问题的求解,同时还可以几何形式将优化结果对 FEW-N 系统中各个维度进行可视化评估。

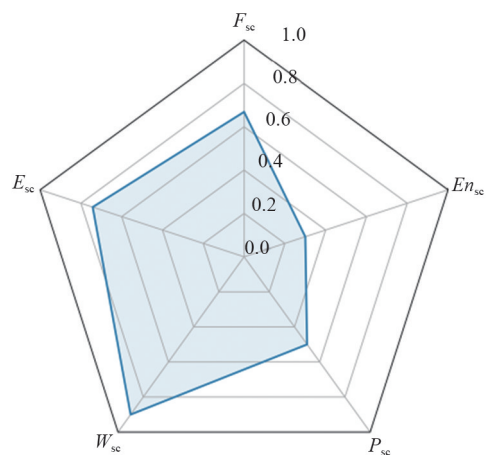


图4 FEW-N综合度量指标GA:五边形雷达图

分析不同 FEW-N 综合度量指标的数学表达式,如图5所示,设定 F_{sc} 、 P_{sc} 、 En_{sc} 为 1 时,分析其余

2个维度 W_{sc} 、 E_{sc} 随不同度量指标的动态变化可以发现,采用 LA 作为综合度量指标进行多目标优化问题求解时,虽然可以预见使用线性指标可降低系统求解难度,但如图 5(a)所示,系统决策在一个维度上的改善完全有可能被另一个维度的恶化等比例抵消,这一现象表明,具有极端表现的优化方案与各个维度具有均衡表现的优化方案可能具有相

同的 LA 指标值。图 5(b)、(c)则表明,当整合的阶数增加时,各个维度之间的相互抵消现象有减弱的趋势。相比于线性指标 LA , BA 和 TA 指标的表现更好。而 GA 则在表现优于 LA 的情况下,其数学表达形式相对较为简单,为求解过程降低了复杂程度,同时,该指标还具有几何意义,为决策者进行量化评估提供了可视化工具。

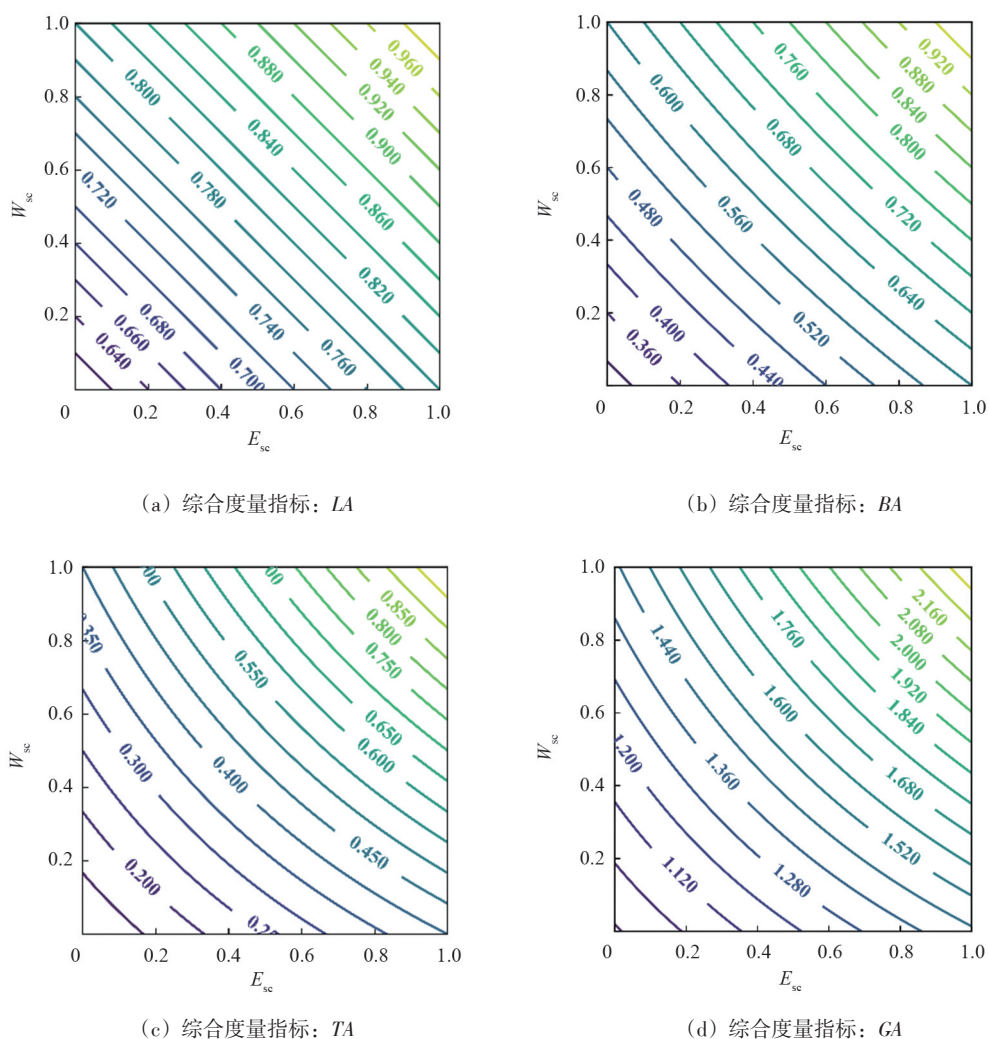


图5 FEW-N综合度量指标的等值线

3 结果与讨论

根据图3所述方法框架,在获得系统超结构模型、生产单元模型、确定优化目标和约束条件后,可利用FEW-N综合度量指标将MOO问题转化为单

目标问题进行求解。求解平台为GAMS软件,优化求解器为ANTIGONE。表2总结了不同的FEW-N综合度量指标(LA 、 BA 、 TA 、 GA)作为待优化目标时的折衷最优方案,方案中决策内容主要包括最优的食品总产量、总耗能量、总用水量、总利润、总环境

罚值,不同类型的用地比例分配,资源、产物、技术等利用途径和循环方式。结果显示,不同的FEW-N综合度量指标对应的优化方案提供的用地分配比例,资源、产物和技术利用途径和循环方式基本一致,食品总产量等多目标最优的数值上则有

所不同。同时,注意到在采用相同求解器的情况下,多次测试显示($n>20$),高阶指标(TA)的求解效率明显低于低阶指标(LA,BA,GA),在所有指标中, GA 和 LA 的求解效率较高。

图6以雷达图的形式分别可视化比较了考虑

表2 基于FEW-N综合度量指标的优化方案对比

决策变量	max LA	max BA	max TA	max GA
作物用地比例	小麦玉米轮作地块 (2)	小麦玉米轮作地块 (2)	小麦玉米轮作地块 (2)	小麦玉米轮作地块 (2)
动物用地比例	奶牛(1) 猪(1)	奶牛(1) 猪(1)	奶牛(1) 猪(1)	奶牛(1) 猪(1)
总利润/元	52864	8588	-156501	10069
食品总产量/MJ	3008923	2370371	1907058	837442
总耗能量/MJ	1297715	831546	804554	392478
总用水量/t	15297	3155	6334	3100
总环境罚值/元	26070	6448	5841	6696
灌溉水质量选择	高质量	高质量	高质量(0.6%) 低质量(99.4%)	高质量
作物副产物处理途径	动物饲料(3%) 还田(3%) 市场(94%)	动物饲料(3%) 还田(3%) 市场(94%)	动物饲料(3.4%) 还田(5%) 市场(92.6%)	动物饲料(2.2%) 还田(0.1%) 市场(97.7%)
动物副产物处理途径	市场	市场	市场	还田(37.6%) 市场(62.4%)
是否选择发酵技术处理	否	否	否	否
其他动物饲料来源	市场	市场	市场	市场
动物草料来源	作物生产单元	作物生产单元	作物生产单元	作物生产单元
计算时间	10~30 s	~10 min	~30 min	~2 min

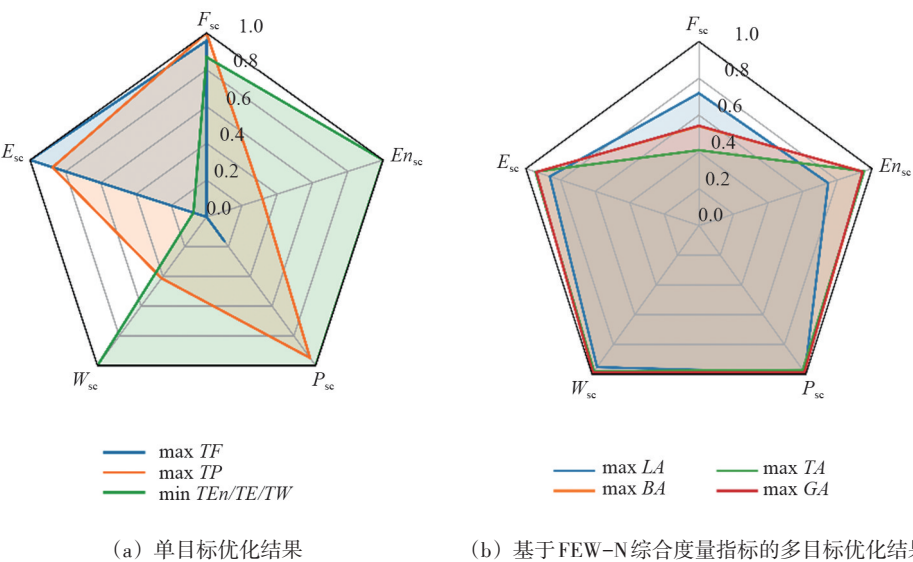


图6 基于不同目标的优化结果对比与评估

单一目标维度的优化方案(图6(a))和基于FEW-N综合度量指标的多目标优化方案(图6(b))。其中,单一目标优化方案的5大优化目标为 $\max TF$ 、 $\min TE$ 、 $\min TW$ 、 $\max TP$ 、 $\min TEn$,多目标优化方案的目标为4种FEW-N综合度量指标 $\max LA$ 、 $\max BA$ 、 $\max TA$ 、 $\max GA$ 。结果显示,单一目标优化方案多面临在不同目标维度表现极不均衡的现象;相比之下,基于FEW-N综合度量指标的多目标优化方案则在不同目标维度具有稳定表现,且本文设计的4种综合指标对应方案的表现差别不大,表明综合指标方法具有良好的稳定性。

农业用地系统优化决策最主要在于统筹FEW和用地资源、经济投入以及环境可持续发展问题,在满足生产需求的基础上追求技术路线的优化升级,实现节能减排和经济效益提高,减少生态环境压力等多个优化目标。如何量化对比评估不同决策方案并实现稳定科学决策是任何优化决策方案均需解决的问题。本文针对这些优化目标提出相应的优化指标,并以此为基础构建整合多种优化目标考量的综合度量指标。根据以上计算得到的评估结果,以双线性整合方式为基础构建的FEW-N综合度量指标 GA 、 BA 能够高效求解多目标优化问题,获得系统折衷最优的用地和资源配置方案,还可以通过可视化方式对不同方案进行量化评估。针对研究区域案例的评估结果显示,相比于只考虑单一目标的决策,综合度量指标导向的决策明显更加合理,资源配置更加均衡,稳定性更高,因此,本文所述指标体系不仅可用于已有决策方案的评估,还可以此为优化目标进行全要素最优决策方案的构建。同时,该指标体系所包含的目标要素可根据不同案例地区的实际情况进行个性化定制调整,以满足当地实际决策需要。

本研究也存在一些不足。其一,本文所述的农业用地优化决策方法框架的优化对象为用地单元网格的数量和FEW资源配置的优化两个方面,旨在探讨适用于此类FEW-N用地系统优化决策问题求解和评估的一套通用度量指标,目前还未涉及空间优化,将在下一步工作中展示包含空间优化的决策方法框架。其二,针对大规模的用地网格系统,

如何权衡不同类型综合度量指标的有效性和求解效率,还需要在下一步工作中进一步验证。

4 结论

为解决农业生产中核心的用地和资源配置优化问题,通过引入FEW-N概念和方法,构建了以用地为核心载体的FEW-N农业用地系统,在包含设计、建模、优化和评估的通用方法体系的基础上,针对FEW-N农业用地系统面临多目标冲突、难以获得系统折衷最优决策的问题,构建了一套基于FEW-N的多目标优化和评估指标体系。该方法可根据不同的求解目标分别设定指标,并设计一套综合度量评价指标整合多目标优化问题,从而获得基于多目标的最优综合决策方案。基于综合度量指标的最优结构设计在同时考虑利润、食品产量、能耗/产能、用水量和环境罚值等多种目标指标时,具有更高更均衡的量化评估结果,证明该指标体系可为决策者综合考虑最优决策方案提供定量评估结果,实现系统的FEW全要素分析,为从系统角度解决用地结构问题提供决策方法。

参考文献(References)

- [1] Ellis E C, Ramankutty N. Putting people in the map: Anthropogenic biomes of the world[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, Wiley Online Library, 2008, 6(8): 439-447.
- [2] Alexandratos N, Bruinsma J. World agriculture towards 2030/2050: The 2012 revision[R]. Rome: FAO, 2012.
- [3] Sims R E. "Energy-smart" food for people and climate: Issue paper[R]. Rome: FAO, 2011.
- [4] Desa U. World population prospects: The 2015 revision, key findings and advance tables[M]. New York: United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2015.
- [5] Ferroukhi R, Nagpal D, López-Peña Á, et al. Renewable energy in the water, energy & food nexus[M]. Abu Dhabi: IRENA, 2015.
- [6] Ramankutty N, Mehrabi Z, Waha K, et al. Trends in global agricultural land use: Implications for environmental

- health and food security[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2018(69): 789–815.
- [7] Programme U N E. Global environment outlook 5: Environment for the future we want[M]. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2012.
- [8] WHO U. Progress on drinking water, sanitation and hygiene: 2017 update and SDG baselines[R]. Switzerland: WHO, 2017.
- [9] World Water Assessment Programme. The United Nations world water development report 4: Managing water under uncertainty and risk[M]. Paris: UNESCO, 2012.
- [10] Dudley B. BP statistical review of world energy 2016[R]. London: BP, 2015.
- [11] Cui K, Shoemaker S P. A look at food security in China [J]. *npj Science of Food*, 2018(2): 4.
- [12] Badarudin I, Sultan A B M, Sulaiman M N, et al. Meta-heuristic approaches for optimizing agricultural land areas[C]//2009 2nd Conference on Data Mining and Optimization. IEEE, 2009: 28–31.
- [13] D'odorico P, Davis K F, Rosa L, et al. The global food-energy-water nexus[J]. *Reviews of Geophysics*, 2018, 56(3): 456–531.
- [14] 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.
- [15] Keairns D L, Darton R C, Irabien A. The energy-water-food nexus[J]. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 2016(7): 239–262.
- [16] Uen T S, Chang F J, Zhou Y L, et al. Exploring synergistic benefits of water-food-energy nexus through multi-objective reservoir optimization schemes[J]. *Science of the Total Environment*, 2018(633): 341–351.
- [17] Dhaubanjhar S, Davidsen C, Bauer-Gottwein P. Multi-objective optimization for analysis of changing trade-offs in the nepalese water-energy-food nexus with hydropower development[J]. *Water*, 2017, 9(3): 162.
- [18] Chiandussi G, Codegone M, Ferrero S, et al. Comparison of multi-objective optimization methodologies for engineering applications[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2012, 63(5): 912–942.
- [19] Marler R T, Arora J S. Survey of multi-objective optimization methods for engineering[J]. *Structural and Multi-disciplinary Optimization*, 2004, 26(6): 369–395.
- [20] Zapotecas-Martinez S, Coello C A C, Aguirre H E, et al. A review of features and limitations of existing scalable multiobjective test suites[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2019, 23(1): 130–142.
- [21] Zhu W, Huang Y, Sun Z. Mapping crop leaf area index from multi-spectral imagery onboard an unmanned aerial vehicle[C]//2018 7th International Conference on Agro-geoinformatics (Agro-geoinformatics). IEEE, 2018: 1–5.
- [22] Fang Q X, Yu Q, Wang E L, et al. Soil nitrate accumulation, leaching and crop nitrogen use as influenced by fertilization and irrigation in an intensive wheat-maize double cropping system in the North China Plain[J]. *Plant and Soil*, 2006, 284(1–2): 335–350.
- [23] Nie Y L, Avraamidou S, Li J, et al. Land use modeling and optimization based on food-energy-water nexus: A case study on crop-livestock systems[M]//Computer Aided Chemical Engineering. Netherlands: Elsevier, 2018, 44: 1939–1944.
- [24] Nie Y L, Avraamidou S, Xiao X, et al. A food-energy-water nexus approach for land use optimization[J]. *Science of the Total Environment*, 2019(659): 7–19.

Towards a food–energy–water nexus metric for agricultural land use optimization and decision

NIE Yaling¹, XIAO Xin^{1*}, ZENG Yujiao¹, ZHU Min¹, LU Dongyun¹, LI Jie²

1. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. Centre for Process Integration, Department of Chemical Engineering and Analytical Science, The University of Manchester, Manchester, UK M13 9PL

Abstract Food, energy and water (FEW) are the three essential pillars for human-being and society. Agricultural land is the largest ecosystem to provide food for human by consuming a large amount of energy and water. As population increases, there is an increasing pressure to address issues of the resource allocation and other conflicting objectives. Systematic thinking based on food–energy–water nexus (FEW–N) is necessary for the modeling and the optimization of the systems. However, challenges arise in making decisions among conflicting objectives, such as the profit, the food demand, the friendly environment, and the efficient use of water and energy. Despite the global studies of data, models and multi-objective optimization techniques, the holistic studies navigating the land use problems, exploring the trade-offs of land and the FEW resources are still few and far between, as well as the general and quantitative metrics for different solutions of the land use systems. Taking an experimental station in Shandong province as a FEW–N land use system, series of composite FEW–N metrics are developed to help solve the multi-objective optimization problem with systematic assessments. Computational results indicate that the trade-offs among diverse stakeholders can be achieved most effectively and consistently based on the composite FEW–N metrics. All objective-related solutions can be quantitatively evaluated by the proposed metrics, and the geometric metric *GA* can provide a visualization tool for comparisons of different solutions, to help the policy-makers to adjust policies across different stakeholders, production sectors, and technologies.

Keywords land use optimization and decision; food–energy–water nexus; multi-objective optimization; metric ●



(责任编辑 傅雪)