

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.03.042

基于水约束的种植结构优化方法综述

王志鹏, 刘群昌, 戴 玮, 史 源

(中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘 要: 我国水少地多, 农业用水占总用水量的一半以上, 农业水资源短缺问题受到越来越广泛的关注。通过种植结构调整可以实现对水资源、农作物面积以及土地资源的优化配置。综述了种植结构优化在国内外的的发展概况, 并总结分析了种植结构优化目标的确定方法及模型求解的传统与智能算法, 最后探讨了种植结构优化发展中的一些问题, 并对未来研究的方向进行了展望。

关键词: 水约束; 种植结构优化; 优化目标; 算法

中图分类号: F323.213

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)03-0231-05

A Review of the Optimization Method of Planting Structure Based on Water Constraints

WANG Zhipeng, LIU Qunchang, DAI Wei, SHI Yuan

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: China has more land with less water. The agriculture accounts for more than half of total water consumption. The problem of water shortage in agriculture has received more and more attention. The optimal allocation of water resources, crop area and land resources can be realized through the adjustment of planting structure. This paper summarizes the development of planting structure optimization all over the world, analyzes the determination method of planting structure optimization objective and the traditional and intelligent algorithm of model solving, and discusses some problems in the development of planting structure optimization, and finally proposes some of the future research directions.

Keywords: water constraints; planting structural optimization; optimization goal; algorithm

近年来,水资源短缺问题在国内受到越来越广泛的关注。水资源优化配置虽然可以在一定程度上缓解水资源供需矛盾突出的问题,但单纯依靠水资源优化配置难以满足水需求的多样性及多变性^[1],如华北地区人口占全国总人口的24.5%,水资源总量却不到全国的6%,且降水年间与年际变化很大^[2],在现有农业种植结构下,只对水资源进行调整已远不能满足当地粮食生产、经济发展与区域的可持续发展的需求。据统计,我国农业用水量占全国的70%~80%,而种植业用水占农业总用水的85%^[3]。因此,在水资源约束条件下,以经济效益和生态效益为目标,优化作物种植结构,对实现水资源与农业的可持续发展起着重要作用,在未来农业水

资源发展中必将占据越来越重要的位置。

1 基于水约束的种植结构优化在国内 外发展概况

在国外,早期的研究主要集中在不同的自然资源状况和社会发展水平对农作制度进行划分和比较。随着时间的推移,在资源优势和经济状况方面,不同的国家和地区形成了不同的格局,导致了各有侧重的研究方向,其中,欧美国家在农业方面发展较快且人少地多,形成了侧重于经济效益及其资源和环境保护的发展格局,而亚洲和非洲的一些国家由于人多地少,只能发展生存型农业,这些国家把农业发展的重点放在增加产量上,研究的内容主要是两

收稿日期:2018-12-10

修稿日期:2019-01-15

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401403);国家科技支撑计划(2015BAD24B02);国家自然科学基金项目(51509269)

作者简介:王志鹏(1994—),女,河北廊坊人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉工程技术。E-mail: 646307703@qq.com

通讯作者:刘群昌(1964—),男,河南南阳人,教授级高级工程师,主要从事节水灌溉工程技术研究。E-mail: liuqc@iwhr.com

个方面,一是如何使有限的农业资源得到充分有效的利用,二是如何生产满足人民生活和国家发展的粮食^[4]。多熟种植较早形成于亚洲的一些湿润热带区,尤其是在 20 世纪 40 年代中期,亚洲东南部地区在这方面的研究取得了极大的进展,20 世纪 60 年代后,亚洲国家逐渐把对种植制度的研究放在了越来越重要的位置上^[5]。随后的十年,大部分南亚和东南亚国家对种植制度进行了更深入的研究^[4],并逐步开展了对种植制度目标和方法学的研究。在热带雨林地区,由于湿润的天气及人口增加导致的粮食需求,逐步形成了农林复合种植制度^[5-6]。农业商品化始于 19 世纪,当时,美国根据对自身自然资源与其它资源状况的分析和比较,形成了一年一熟的专业化作物种植带的农业格局^[4]。进入 20 世纪 80 年代后,由于可持续农业发展理念的提出,美国在考虑了本国自然资源与生产条件后,发展方向转变为对长期低投入种植的研究^[7]。随后,种植制度的开展越来越多地开始重视经济效益,对低投入种植制度的研究随之兴起^[8-9]。

国内种植结构优化的发展状况可从两方面进行分析,一是从调整的内容和目的来看,自 1949 年至改革开放之前,大部分的种植业结构由政府直接调整,随着时间的增加,人口也不断增多,要以占世界 7% 的耕地养活占世界 22% 的人口,对种植业调整的第一要务就是高产、多产,如何形成高产,多熟的种植模式成为当时种植业调整的主要重点^[10]。进入 20 世纪 90 年代以来,对经济效益的追求开始在种植结构优化中占据越来越重要的位置。这个时期,“多元种植”开始成为种植结构优化的主体,研究变为对各个地区进行与之自然与资源条件相匹配的多元种植制度调整为重点^[11-12]。二是从种植结构调整的方法上看,国内对农业结构调整进行定量分析优化始于 20 世纪 80 年代^[10]。在这个时期之后,很多数学物理分析方法被应用于种植结构的优化调整中,如线性规划、熵权规划、灰色理论、结构理论等^[13]。如今,随着科学技术的发展,高新技术如 GIS 和遥感被越来越多的应用于种植结构优化中,由于这些技术的加入使优化变得更加便捷与多样化,对未来的种植结构优化调整提供了一个很好的研究方向。

2 基于水约束的种植结构优化目标研究综述

水资源约束下的种植结构优化多是根据区域水

资源配置对作物种植结构进行调整以实现最大的目标效益。由于种植结构优化方法自身会受到很多因素的影响,如地理环境,作物种类,水资源条件及当地的经济状况等,因此,种植结构优化目标的确定形成了多种方法。

种植结构优化方法首先要确定优化目标及约束条件,再根据数学方法构建相应的优化模型。

2.1 种植结构单目标优化

种植结构单目标优化一般是指以经济效益最大,粮食产量最高,经济增量最多等单一目标建立的种植结构优化模型。

早期的种植结构优化模型多以经济增益和粮食增产等为目标建立的单一目标规划模型。如许拯民^[14]以经济效益最大为目标建立了种植结构优化模型,在供水能力,养殖业,土地面积,农业生产总量等约束条件下,以种植面积为决策变量对种植结构进行了优化。王书裕^[15]以粮食产量最大为目标建立的线性目标函数,在种植面积,稳产,高产,有利于提高和恢复地力等约束下对作物种植面积进行安排以使粮食产量达到最大。随后,很多研究开始在追求目标效益的同时考虑水资源对农业种植的影响。如 Khepar 等^[16]为寻求运河灌区的最佳种植模式,以净效益最大为目标,比较了多种可选择的地下水模式并对作物生长的适宜土壤环境进行了研究。闫听领等^[17]将作物总净收益最大化,以南水北调中线供水区的农业灌溉量为依据,结合国家对三种作物种植比例的规划,拟定了三种不同种植结构方案。在考虑了区域之间的相互联系后,梁美社等^[18]将虚拟水贸易作为一种调节工具,提出了基于区域虚拟水贸易的种植结构优化模型,在以农业经济效益增加量最大为目标的同时,还综合考虑了生态效益。在之后的发展中,部分研究还考虑到了时间与灌溉方式对种植结构的影响。如张帆等^[19]以经济效益最大为目标构建了双区间两阶段随机优化模型,构建的模型对五个水平年的种植结构进行了优化,并将优化结果与现状水平年进行了比较。林琳等^[20]开展了种植结构变化下渠井结合灌区用水优化配置研究,得出作物种植比例为 0.9,渠井用水比为 2:1 下,灌区经济效益最大,为 1205 万元。

2.2 种植结构多目标优化

随着农业可持续发展观念的普及,原有的种植观念发生了改变,由单纯追求产量和收益的单目标模式转向追求以产量为基础,经济生态效益并重的多目标模式^[21]。如周宝利等^[22]对经济效益、社会

效益及生态效益三个目标进行规划,以菜源结构为指导,在作物最相匹配的条件下建立了多目标优化模型;Mainuddin 等^[23]以净收益和作物灌溉面积最大为目标,结合可利用资源的不确定性,建立了一个机会约束优化模型。随着时间的推移,水资源约束被逐渐运用到种植结构优化中,如李莱等^[24]以上下层种植综合效益为目标,在最小灌溉水量条件下定量得到了研究区域的最大种植收益,并且兼顾并综合了上下层管理者的建议,构建了基于双层分式规划的多目标优化模型。在这之后,由于实际情况的差异,研究者设定了不同目标来进行种植结构的优化。如 Raju 等^[25]以净效益、作物产量和劳力雇佣三个相互矛盾的项目为目标,在多目标规划环境下,构建了优化模型。张帆等^[26]以种植作物经济收益期望值与种植作物用水量期望值为目标,以目标比值方式构建分式规划,得到了不同水文年不同可用水量条件下的种植结构。黄丽丽等^[27]将总产量、相对生态价值最大和肥料施用量最小作为规划目标,构建了多目标模型,模型可以进行参数区间不确定性以及约束模糊不确定性的处理。

随着水资源的不确定性与农业种植需求的多样化发展,基于水约束的种植结构多目标优化会得到越来越多的应用,多目标优化研究也将占据越来越重要的位置。

3 基于水约束的种植结构优化算法研究综述

随着时间的发展与对科学技术和数学方法的研究进展,对于种植结构优化模型的求解形成了多种方法。

3.1 传统优化算法

种植结构优化在选定好优化目标后,传统算法往往采用线性规划对单目标进行求解^[28]。Heady^[29]第一次将线性规划引入作物种植面积分配问题中,随后对于种植结构优化单目标优化问题多采用此方法进行求解。对于多目标求解问题,传统算法常采用权重法将其转换为单目标问题进行求解,如卢剑波^[30]在提到的线性加权法,即由有经验的一群人主观决定各目标的权重大小。李丹^[31]运用层次分析法来确定各目标的权重,从而解决了多目标求解问题。汤瑞凉^[32]提出用熵权系数法确定权重,构建了一种以主观权重与客观权重之积解决多目标问题的模型方法。陈守煜等^[33]提出模糊定权的方法,运用模糊理论对各目标权重进行求解。武雪萍等^[34]运

用灰色理论来确定权重,解决了确定权重过程的不确定性问题。张端梅等^[35]采用模糊偏好的方法来解决多目标的权重问题。郭晓晓^[36]利用3S技术,运用层次分析法,确定每个因子的权重,构建了基于像元的优化模型。此外,Raju 等^[25]以净效益、作物产量和劳力雇佣为目标,先求得目标函数的最大值与最小值,最后将经济效益确定为目标函数,将作物产量与劳力雇佣利用最大最小值转换为约束条件,以求解最优值。黄丽丽等^[27]基于“Max - min”理论,引入两相模糊规划,实现了对多目标的求解。

传统的优化算法对多目标进行求解时,多是采用一些数学方法将多目标问题转换为单目标问题,然后用已有的成熟理论进行处理,多数情况只能求得一个最优解,对一些复杂的非线性问题求解困难。

3.2 遗传进化算法

1975年,Holland^[37]教授在他的著作中第一次提到了遗传算法这一概念,这是通过模拟生物自然进化过程来进行最优解搜索的一种算法^[38]。其主要优点是:可以直接对优化目标进行操作,很大程度上避免了对优化结构的数学计算;内部隐并行性强,且可以非常有效的进行全局意义的概率搜索;具有极大的灵活性及优异的全局观^[39]。高洪香等^[40]将遗传算法用于求解灌区的种植结构调整,通过 MATLAB 遗传编程,最后得出多种优化方案,并从中选出最优的结果。彭长青等^[41]将遗传算法与 GIS 相结合,通过对自然进化过程的探讨模拟,利用简易的编码技术和遗传相关操作高效地解决了组合优化的难题。

遗传算法不是从一个点开始进行求解,而是从很多点开始进行计算,这种特性降低了产生局部收敛解的可能性,且遗传算法对不同问题与不同条件的适用性很强,但使用该算法进行求解时,在算法,计算量,参数设置等方面存在一定局限性。

3.3 智能优化算法

种植结构优化是一个连续的非线性问题,已有的算法往往运算缓慢且对于一些复杂问题求解困难,因此,必须进行优化算法的改进,智能优化算法的提出使这个困难得到了缓解。近年来,蚁群算法,粒子群算法在种植结构优化方面得到了越来越广泛的应用。这些算法在解决问题时,使优化的效率和效果得到了极大的提高。

3.3.1 基于蚁群算法的种植结构优化研究综述

蚁群算法最早是由意大利学者 Colom 等于 1992 年提出的,是一种由研究蚂蚁如何寻找路径来发现

食物而提出的一种启发式仿生算法^[42]。由于它采用分布式并行计算机制,使之易与其他方法结合,且具有较强的抗变换性^[43]。蚁群算法可以概括为适应和协作两个阶段^[44-45],在第一个阶段,候选解通过信息的累积不停对自身构造进行调整;在第二阶段,候选解通过互相的信息沟通,不断更新以产生问题的最优解^[42]。如张智韬等^[46]将蚁群算方法与遥感获取图像相结合,对不同方案下两种不同的约束方案进行优化求解,通过优化结果选出最优方案。

蚁群算法可以适用于求解全局性问题,对全局进行搜索,并可以进行复杂问题的求解,但因此也会产生相应的运算时长,耗时较多。目前将蚁群算法用于种植结构优化求解还有很多发展空间,有着很好的研究前景。

3.3.2 基于粒子群算法的种植结构优化研究综述

粒子群算法是在 20 世纪中期由 Kennedy 等^[47]提出的一种模拟优化智能算法。粒子群算法对群体行为机制进行了模仿,并且结合了美国生物学家提出的生物群体模型,同时还融入了进化计算的思想,是一种根源于人工生命的研究,粒子群算法的基本原理是随机粒子群根据其自适应性在解空间飞行,动态更新自己的速度和位置,并用相关函数和方法计算它们的适应度,选出 Pbest(个体极值)和 Gbest(全局极值),最终通过迭代寻求最优解^[48]。如陈兆波^[28]综述了各算法并分析了优缺点后,用粒子群算法进行了种植结构优化多目标求解。王玉宝^[49]对原有的粒子群求解的方法的缺点进行阐述后,采用混沌粒子群算法解决了种植结构多目标优化问题。随后,王雷明^[50]利用 MATLAB 进行编程,对优化模型采用自适应混沌粒子群算法进行求解。

粒子群智能算法在编程方面较简单,计算结果的收敛速度较其他算法快,结果的精确度也相对要高。因此,粒子群算法成为当前解决多目标问题应用最多的算法。但是对于不同问题的求解,如何选择参数以达到最优效果,以及对速度的动态调节方面,仍存在一定的局限性。

4 存在问题及展望

综上所述,国内外对种植结构优化方面的研究经历了由浅至深、逐渐成熟的过程,研究成果也比较丰富,但仍有很多值得思考的问题与发展的空间,主要体现在以下几个方面。

(1) 目标函数确定还不够完善。现有优化方法的目标多数只考虑粮食产量最大、经济效益最高,即

便是考虑了生态问题,也是定性分析多,缺乏量化的科学表达,影响了优化结果的可靠度和应用价值。目标函数确定是一个复杂、动态的系统工程,国民经济发展状况、水资源禀性、气候变化、土壤条件、人类活动、科技进步等等都与目标有显性和隐性的关联,因此合理确定目标函数仍是今后研究的内容之一。

(2) 约束条件缺乏系统性。“水多、水少、水脏”都会影响作物种植的结构、效益,且在不同区域各有侧重。如北方地区主要表现在水资源缺乏及水污染严重,缺水是限制条件;而南方地区则水多需要排涝、季节性缺水需要灌溉,水污染状况更不容乐观。但现有的资源约束因素多关注缺水而往往忽略水多和水脏问题;同时,水资源约束问题还涉及到上下游、左右岸的关系,灌溉、生活、市政、生态等用户。因此,应在考虑区域水资源承载量的情况下,使各方效益均衡分配,均达到约束条件下的最优,并使目标函数的确定和约束条件的设置与研究区域需求相匹配。

(3) 模型求解尚待进一步优化。目前,有关种植结构优化的算法虽已经趋于成熟,求解方法已由传统算法逐步转变为智能算法,但由于实际问题的多样性与多变性,对不同实际问题求解的适应性尚需验证;在参数设置及动态调节方面仍存在一定的可进步空间。同时,种植结构优化是一个复杂的连续过程,如对于时空变动,上下层效益,区域与整体水资源协调以及与决策者交互等问题,现有模型方法往往只考虑其中一个因素,缺乏一个全面的,系统的可以解决这些问题的模型方法。

5 结 语

水资源短缺问题已成为一个世界性问题,在我国,农业用水占水资源总量的一半以上,实施基于水约束的种植结构优化可以有效的调节整体水资源及农业用水。如今,随着我国综合国力的提升,对农业生产早已不是一味地追求经济效益的增长,而种植结构优化方法可以综合考虑生态效益及社会效益,并使农业生产向着更高效高产的方向发展。因此,构建水约束下的种植结构优化调整不仅可以优化调整种植结构以达到预期效益,还有利于水资源的高效利用,是促进区域可持续发展的重要措施。

在今后的研究中,如在进行优化设计时,应多注重区域之间的联系,尤其是区域之间水资源的调度问题,将局部水资源问题与总体联系起来,考虑总体与局部之间的效益平衡。对于优化算法,需提出一

个同时具备适应性与通用性的算法,以期在各种条件下的优化都能输出精确结果,并且加快与高新技术结合的研究,如与GIS,遥感等的结合,建立基于高新技术的优化求解平台。最后,除了考虑水资源和区域效益等问题,还可以综合种植制度、灌溉技术等多方面进行优化,以期在优化种植结构的同时,还能提高作物成活率,进一步减少水资源的浪费。

参考文献:

- [1] 曾雪婷,李永平.基于节水目标的干旱地区水权交易模型研究[J].水利水电技术,2013,44(7):91.
- [2] 许仁田,吴瑜.华北地区水资源面临困境及解决措施[J].地理教育,2014(12):57-58.
- [3] 李小梅,崔远来,谢先红.基于SWAP的旱稻灌溉模式研究[J].中国科技论文,2008,3(7):530-535.
- [4] 武兰芳,陈阜,欧阳竹.种植制度演变与研究进展[J].耕作与栽培,2002(3):1-5.
- [5] Hoque M Z. Traditional cropping systems in Asia[C]//Cropping Systems in Asia; On-farm Research and Management, 1984:53-98.
- [6] Stepler H A, Lundgren B O. Agroforestry: now and in the future[J]. Outlook on Agriculture, 1988,17(4):146-152.
- [7] Haggard J P. Trees in alley cropping: competitors or soil improves? [J]. Outlook on Agriculture, 1994,23(1):27-32.
- [8] Ott S L, Hargrove W L. Profits and risks of using crimson clover and hairy vetch cover crops in no-till corn production [J]. American Journal of Alternative Agriculture, 1989,4(2):65-70.
- [9] Martin M A. The economics of alternative tillage systems, crop rotations, and herbicide use on three representative east-central corn belt farms [J]. Weed Science, 1991,39(2):299-307.
- [10] Foltz J C, Lee J G, Martin M A. Farm-level economic and environmental impacts of eastern Corn Belt cropping systems [J]. Journal of Production Agriculture, 1993,6(6):290.
- [11] 高琼.陕西渭北旱塬节水型种植结构优化研究[D].重庆:西南大学,2009.
- [12] 刘巽浩,陈阜,吴尧.多熟种植——中国农业的中流砥柱[J].作物杂志,2015(6):1-9.
- [13] 陈子志.通辽县木里图公社农牧林结构优化初探[J].北方农业学报,1984(2):17-21.
- [14] 许拯民.河南省郑县水资源与农业种植结构调整优化规划研究[J].水利发展研究,2005,5(7):44-46.
- [15] 王书裕.吉林省中部地区主要旱田作物种植结构的探讨[J].地理科学,1986,6(1):70-75.
- [16] Khepar S D, Chaturvedi M C. Optimum cropping and ground water management [J]. Jawra Journal of the American Water Resources Association, 2010,18(4):655-660.
- [17] 阎听领,王登瀛.南水北调(中线)唐白河灌区作物种植结构优化分析[J].人民长江,1988(11):17-20,37.
- [18] 梁美社,王正中.基于虚拟水战略的农业种植结构优化模型[J].农业工程学报,2010,26(S1):130-133.
- [19] 张帆,郭萍,李莱.基于双区间两阶段随机规划的黑河中游主要农作物种植结构优化[J].中国农业大学学报,2016,21(11):109-116.
- [20] 林琳,田军仓,朱磊.种植结构变化下渠井结合灌区用水优化配置研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(4):162-167.
- [21] 黄丽丽,黄振芳.区间两相模糊多目标模型在种植结构优化中的应用——以辽宁省大连市为例[J].资源科学,2016,38(11):2157-2167.
- [22] 周宝利,葛晓光,王秉昆,等.多目标规划在蔬菜种植结构优化中的应用[J].土壤与作物,1995,11(3):189-192.
- [23] Mainuddin M, Gupta A D, Onta P R. Optimal crop planning model for an existing groundwater irrigation project in Thailand [J]. Agricultural Water Management, 2007,33(1):43-62.
- [24] 李莱,郭萍,LiMo,等.基于双层分式规划的种植结构多目标模型研究[J].农业机械学报,2014,45(9):168-174.
- [25] Raju K S, Kumar D N. Multicriterion decision making in irrigation planning [J]. Agricultural Systems, 2010,54(4):455-465.
- [26] 张帆,郭萍,任冲锋.分式两阶段随机优化模型在作物种植结构优化中的应用[J].中国农村水利水电,2016(9):111-114.
- [27] 黄丽丽,黄振芳.区间两相模糊多目标模型在种植结构优化中的应用——以辽宁省大连市为例[J].资源科学,2016,38(11):2157-2167.
- [28] 陈兆波.基于水资源高效利用的塔里木河流域农业种植结构优化研究[D].北京:中国农业科学院,2008.
- [29] Heady E O. Simplified presentation and logical aspects of linear programming technique [J]. Journal of Farm Economics, 1954,36(5):1035-1048.
- [30] 卢剑波.多目标规划方法及其在农业生产决策中的应用[J].农业系统科学与综合研究,1991,7(1):70-72.
- [31] 李丹.福建省龙海市稻田高产优质高效种植结构的优化[J].福建农业大学学报,1997,26(2):147-152.
- [32] 汤瑞凉,郭存芝,董晓娟.灌溉水资源优化调配的熵权系数模型研究[J].河海大学学报(自然科学版),2000,28(1):18-21.
- [33] 陈守煜,马建琴,张振伟.作物种植结构多目标模糊优化模型与方法[J].大连理工大学学报,2003,43(1):12-15.