

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

张帆 郭萍* 李茉

(中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100083)

摘要 为优化有限农业水资源量下的种植结构以实现最大经济效益,考虑种植结构优化过程中存在的水文要素与社会经济要素中存在的确定性,构建以经济效益最大为目标的双区间两阶段随机规划模型。在农业水资源量测算时出现了双区间特点,故使用双区间理论对农业水资源量进行表征计算。将构建的模型用于黑河中游甘肃省张掖市甘州区、临泽县、高台县的5种水文年(枯水年、较枯水年、平水年、较丰水年以及丰水年)下的种植结构优化,比较了优化结果与现状水平年种植结构与经济收益。结果表明:通过双区间两阶段随机规划模型得到的3种植植结构优化方案即保守决策方案、趋于平均决策方案和乐观决策方案产生的经济效益比现状水平年种植结构下的经济效益分别提高[1.97,8.53]、[4.20,11.04]、[6.43,13.56]亿元。

关键词 种植结构优化;双区间理论;两阶段随机规划;不确定性

中图分类号 S 274.3

文章编号 1007-4333(2016)11-0109-08

文献标志码 A

Planting structure optimization of main crops in the middle reaches of Heihe River basin on dual interval two stage stochastic programming

ZHANG Fan, GUO Ping*, LI Mo

(College of Water Resources & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract In order to achieve maximum economic benefits under the limited agricultural water resources, a dual interval two stage stochastic programming model to maximum economic benefit is constructed by considering the uncertainties in the hydrological factors and the social economy in the planting structure optimization. The dual interval theory is used to calculate the water resources due to its dual interval uncertain characteristics. This model is applied to the middle reaches of Heihe River basin including three counties, Ganzhou, Linze and Gaotai in Gansu Province under five hydrological years (low flow years, partial low flow years, normal flow years, partial high flow years and special high flow years). By comparing the model results with the status quo, it is found that the economic benefits of three kinds of planting structure optimization schemes given by the dual interval two stage stochastic programming model are increased [1.97,8.53], [4.20,11.04] and [6.43,13.56] billion yuan respectively.

Keywords planting structure optimization; dual interval theory; two stage stochastic programming; uncertainty

水资源是推动我国经济增长的重要因素,我国水资源量消耗最大的是农业^[1]。由于不同作物的市场价格以及耗水量等因素影响,水资源在作物间的不同配置方式会带来不同经济收益。为了使水资源

得以充分利用,达到最大效益,就需要在保证地区粮食安全,农作物产品产出结构合理的基础上,调整不同水文年下不同农业水资源可利用量的作物种植结构。尤其对于干旱半干旱地区,在有限农业可用水

收稿日期:2016-02-25

基金项目:国家高技术研究发展计划(2013AA102904-1);国家自然科学基金重点项目(51439006);水利部公益性行业科研专项经费项目(201501017)

第一作者:张帆,硕士研究生,E-mail:Zhangfcu@163.com

通讯作者:郭萍,教授,主要从事水资源及环境系统不确定性研究,E-mail:09020@cau.edu.cn

资源量约束条件下调整地区种植结构,对于区域农业发展具有重要实际意义。

传统的作物种植结构优化模型通常是确定性的,如张端梅等^[2]建立了灌区多目标种植结构优化模型,并应用于吉林省扶余灌区。李建芳等^[3]基于虚拟水细分理论建立了多目标种植结构优化模型,并应用于甘肃省民勤县。虽然这些优化方法都对实际生产起到了一定的指导意义,但这些优化模型忽略了种植结构优化过程中存在的不确定性。例如不同水文年出现的随机性,市场价格随时间变化产生的灰色性等。因此,对种植结构进行不确定性优化很有必要。我国农业的主要限制因素是水^[4],农业水资源的可利用量不仅仅受到随机出现的不同水文年来水的影响,而且受社会发展、生态变化等其他部门用水变化的影响,而这些用水部门在需求测算时往往会出现不确定性特征,这就导致在进行农业可用水量测算时会有更复杂的不确定性。因此,本研究引入双区间理论并以经济效益最大为目标构建双区间两阶段随机规划模型,以期更好的反映种植结构优化中的不确定性以及农业可用水量测算中表现出的双重不确定性。

1 双区间两阶段随机规划原理

1.1 区间两阶段随机规划模型

两阶段随机规划模型的基本思想是追索,能在随机事件发生之后,通过第二阶段的决策来对第一阶段的配置决策采取弥补和纠正,以降低决策风险和获取最佳妥协方案。该模型不仅可以充分使用通过概率分布形式给出的随机性信息,还可以在不确定性条件下,通过第二阶段决策变量值检验约束越界风险的大小,以反应不确定性参数与经济惩罚间复杂关系;更重要的是进行与经济惩罚相关的情景分析,即如果第一决策阶段(事件发生前)制定的决策被违反,在第二决策阶段(事件发生后)将有相应的惩罚被追加,依此对政策进行纠正,以减少不确定性信息带来的决策失误和损失^[5]。

尽管两阶段随机规划模型能够很好解决资源配置问题,但也存在缺陷,例如不能解决系统中同时存在其他不确定性的问题。基于此,Huang等^[6]提出了区间两阶段随机规划模型并将其应用于水资源管理当中。区间两阶段随机规划模型是区间规划和两阶段规划的结合。整合规划模型的优点在于能同时解决系统中存在的区间和随机问题,并在求解过程

中能将其很好结合在一起。Lu等^[7]将该模型应用于农业水资源优化配置当中,随后Li等^[8]将该模型应用于灌区水资源优化配置实例当中。模型具体表达式^[6]如下:

目标函数

$$\max f^{\pm} = C^{\pm} X_1^{\pm} - \sum_{k=1}^K p_k L^{\pm} X_2^{\pm}$$

约束条件

$$\begin{cases} g(X_1) \leq 0 \\ G(X_2) \leq 0 \end{cases}$$

式中: X_1, X_2 为第一、第二阶段决策变量; C 为第一阶段决策收益; P_k 为随机事件发生概率; L 为随机事件发生后的惩罚; k 为不同随机事件。

1.2 双区间理论

由于现实世界的复杂性,所建立数学模型中某些参数不能精确量化,一般采用随机、模糊、区间等方法来表现所需表达的数字特征。其中,区间数表示不确定数较容易也更符合人们的习惯。但是,有时候可能会遇到区间上下限不能确定的情况^[9],但又希望充分利用数据的数字特征,于是,双区间的方法被提出。

双区间数的一般形式为: $[[a, c], [d, b]]$,其中参数上下限由于不确定性分别为 $[a, c]$ 和 $[d, b]$ 。对于一个双区间 $[[a, c], [d, b]]$,在求解过程中一般要将其分为 $A: [a, d], B: [c, d], C: [a, b]$ 和 $D: [c, b]$,4种单区间情形的某些随机组合^[10]。拆解后根据实际情况和需要来对双区间的结果进行合理组合,便可以得到较为满意的结果。

2 双区间两阶段随机规划模型

2.1 双区间两阶段随机规划模型的建立

由于非农业用水水量存在不确定性,表现出区间特征,而各个水文年的地区可用水量也可以用区间数来表示,在计算农业部门可用水量时,水资源量会表现出双区间特征。在此基础上,结合区间两阶段随机规划模型建立了双区间两阶段随机规划(DITSP)模型。该模型将分配给农业的有限水资源量合理、优化的分配给研究区域不同作物,对作物的种植面积进行优化,使系统整体收益最大。模型具体表达式如下:

目标函数

$$\max f^{\pm} = \sum_{i=1}^I A_i^{\pm} R_i^{\pm} - \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K p_k L_i^{\pm} A_{ik}^{\prime \pm}$$

约束条件

1) 可用水量约束

$$\sum_{i=1}^I M_i (A_i^{\pm} - A_{ik}^{\pm}) \leq [Q_k^{\pm}]^{\pm} \eta$$

2) 粮食安全约束

$$(A_i^{\pm} - A_{ik}^{\pm}) Y_i \geq D_i^{\pm}$$

3) 允许缩减面积约束

$$A_i^{\pm} \geq A_{ik}^{\pm}$$

4) 非负约束

$$A_{ik}^{\pm} \geq 0$$

式中： f^{\pm} 为农业净效益期望值区间，元； i 为研究区域作物种类； k 为不同水文年； A_i^{\pm} 为作物 i 的第一阶段决策种植面积区间， hm^2 ； R_i^{\pm} 为作物单位面积净收益区间 $R_i^{\pm} = Y_i B_i^{\pm} - C_i$ ，元/ hm^2 ； Y_i 为作物单位面积产量， kg/hm^2 ； B_i^{\pm} 为作物单价区间，元/ kg ； C_i 为作物单位面积种植成本，元/ hm^2 ； p_k 为不同水文年出现的概率； L_i^{\pm} 为惩罚系数区间，元/ hm^2 ； A_{ik}^{\pm} 为第二阶段决策变量，是在第一阶段的基础上缩减面积区间， hm^2 ； M_i 为作物 i 的灌溉定额， m^3/hm^2 ； η 为地区灌溉水利用效率； $[Q_k^{\pm}]^{\pm}$ 为第 k 个水文年农业可用水量双区间， m^3 ； D_i^{\pm} 为 i 作物社会最低需求量， kg 。

2.2 双区间两阶段随机规划模型解法

双区间两阶段随机规划模型中，由于可用水量是 $[[a, c], [d, b]]$ 形式的双区间数，所以需将可用水量拆分成 $A: [a, d]$ 、 $B: [c, d]$ 、 $C: [a, b]$ 、 $D: [c, b]$ ，4 种单区间情形，即求解 4 个区间两阶段随机规划模型。

求解区间两阶段随机规划模型，要将模型拆分为上下限子模型：上限子模型为

$$\begin{cases} \max f^+ = \sum_{i=1}^I (A_i^- + \Delta A_i z_i) R_i^+ - \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K p_k L_i^- A_{ik}^- \\ \text{st:} \\ \sum_{i=1}^I M_i [(A_i^- + \Delta A_i z_i) - A_{ik}^-] \leq Q_k^- \cdot \eta \\ [(A_i^- + \Delta A_i z_i) - A_{ik}^-] Y_i \geq D_i^+ \\ A_i^- + \Delta A_i z_i \geq A_{ik}^- \\ A_{ik}^- \geq 0 \end{cases}$$

式中： $0 \leq z_i \leq 1$ ， $\Delta A_i = A_i^+ - A_i^-$ 即第一阶段的决策变量， α 为 A 、 B 、 C 、 D 4 个农业可用水资源量区间。解出决策变量下限后将下限作为下限子模型的约束输入，得到决策变量上限。下限子模型为

$$\begin{cases} \max f^- = \sum_{i=1}^I (A_i^- + \Delta A_i z_i) R_i^- - \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K p_k L_i^+ A_{ik}^+ \\ \text{st:} \\ \sum_{i=1}^I M_i [(A_i^- + \Delta A_i z_i) - A_{ik}^+] \leq Q_k^+ \cdot \eta \\ [(A_i^- + \Delta A_i z_i) - A_{ik}^+] Y_i \geq D_i^- \\ A_{ik}^+ \geq A_{ik}^- \\ A_i^- + \Delta A_i z_i \geq A_{ik}^+ \end{cases}$$

用 LINGO 软件编程计算双区间两阶段随机规划的上、下限子模型。

3 实例应用

3.1 研究区域

本研究选取黑河中游张掖市甘州区、临泽县和高台县为研究区域。所选区域位于黑河干流莺落峡和正义峡之间，河道长 204 km，流域面积 2.56 万 km^2 ，该区光热资源丰富，但干旱严重，主要依靠黑河供水，人工绿洲发育，是甘肃省的重要农业区^[11]。根据黑河 1954—2012 年莺落峡径流拟合经验曲线并结合黑河不同水文年分水方案，得到黑河中游甘州区、临泽县、高台县不同水文年可用水量。以 2014 年为研究现状年，根据《张掖统计年鉴 2014》^[12] 数据对非农业部门耗水量进行测算，生态、生活、养殖以及工业需水量分别为 $[1.87, 2.98]$ 、 0.22 、 0.24 、 0.17 亿 m^3 。由此可得，非农业需水总量为 $[2.50, 3.61]$ 亿 m^3 。

选取张掖市甘州区、临泽县、高台县 3 县的 3 种粮食作物（小麦、玉米、薯类）与 3 种经济作物（油料、蔬菜、制种玉米）6 种典型作物进行研究，将 3 县总可用水量减去非农业部门的需水，即可得到 3 县在不同水文年农业可用水量。查询《张掖统计年鉴 2014》^[12] 可知，所研究的 6 种作物种植面积占农作物种植总面积 89%，故以农业可用水量的 89% 作为此次进行种植结构优化可用水量。经计算，不同水文年甘州区、临泽县、高台县水量情况见表 1，可以看出农业可用水量具有双区间特征。

3.2 研究区域种植现状

种植面积与产量数据引自《张掖统计年鉴》^[12]，农产品价格来源于中国农业信息网 (<http://www.agri.com.cn/>)、食品商务网 (<http://www.21food.cn/>)，灌溉定额引自《甘肃省用水定额》^[13]。由于粮食作物单位面积净收益比经济作物低但耗水量却很大，本研究对于重要作物设置较高惩罚系数进行平衡。

表1 不同水文年甘州区、临泽县、高台县水量情况

Table 1 Water quantity situation of counties of Ganzhou, Linze and Gaotai in different hydrological years

水文年 Hydrological year	出现 概率/% Occurrence probability	来水量/亿 m ³ Incoming water quantity			正义峡下泄 水量/亿 m ³ Water released from Zhengyi gorge	总可用水量/ 亿 m ³ Total available water quantity	农业可用水量/ 亿 m ³ Agricultural water availability
		莺落峡 Yingluo gorge	梨园河及 其他河流 Liyuan river and others	地下水 Ground- water			
枯水年 Low flow years	5	12.10	[1.66, 1.91]	4.81	6.3	[12.27, 12.52]	[[7.71, 7.93], [8.70, 8.92]]
较枯水年 Partial low flow years	20	14.40	[1.85, 2.12]	4.81	7.6	[13.46, 13.73]	[[8.77, 9.01], [9.76, 10.00]]
平水年 Normal flow years	50	16.39	[2.14, 2.85]	4.81	9.5	[13.84, 14.55]	[[9.11, 9.74], [10.10, 10.73]]
较丰水年 Partial high flow years	20	18.13	[2.34, 3.15]	4.81	10.9	[14.38, 15.19]	[[9.59, 10.31], [10.58, 11.30]]
丰水年 High flow years	5	21.21	[2.65, 3.42]	4.81	13.2	[15.47, 16.24]	[[10.56, 11.24], [11.55, 12.24]]

根据《张掖统计年鉴 2014》^[12], 甘州区、临泽县、高台县 3 县总人口为 83.069 万人, 依该地区实际情况设定人均年最低粮食需求 400 kg, 其中小麦 250 kg, 玉米 100 kg, 薯类 50 kg。蔬菜油料需求量根据《中国居民膳食指南》^[14] 平衡膳食的设定, 蔬菜每天每人应摄入 300~500 g, 每天烹油 25 g (出油率按 40% 计算)。对 2009—2014 年间作物产量进行统计后发现, 小麦与薯类作物需要进口, 由于粮食进口超

过总需求的 50% 以上可能会带来粮食安全问题和社会不稳定现象^[3], 故小麦与薯类外调系数设置为 50%。甘临高 3 县是全国制种玉米重要生产基地之一, 常年占全国制种玉米产量 40% 左右, 故以全国制种玉米产量 40% 作为制种玉米产量下限。同时, 考虑现实种植情况, 引入 2009—2014 年所研究的 6 种作物最低产量与上面的约束形成区间数, 构成粮食安全约束。甘州区、临泽县、高台县主要农产品现状见表 2。

表2 2014年甘州区、临泽县、高台县主要农产品现状

Table 2 Main agricultural products status of three counties in 2014

指标 Target	粮食作物 Grain crop			经济作物 Economic crop		
	小麦 Wheat	薯类 Tuber crop	玉米 Corn	油料 Oil crop	蔬菜 Vegetable	制种玉米 Corn for seed
种植面积/hm ² Planting area	13 940.00	1 993.33	26 680.00	1 506.67	24 280.00	46 586.67
单产/(kg/hm ²) Yield per unit	8 439.33	14 299.97	8 385.36	4 924.12	60 547.17	8 006.46
单价/(元/kg) Price per unit	[1.80, 2.60]	[1.90, 2.40]	[2.20, 2.66]	[13.00, 16.00]	[2.50, 3.20]	[9.71, 12.00]
成本/(元/hm ²) Cost	5 850.00	8 925.00	9 250.00	4 250.00	18 250.00	9 438.00
灌溉定额/(m ³ /hm ²) Irrigation quota	5 400.00	6 000.00	6 900.00	6 000.00	8 050.00	6 900.00

表 2(续)

指标 Target	粮食作物 Grain crop			经济作物 Economic crop		
	小麦 Wheat	薯类 Tuber crop	玉米 Corn	油料 Oil crop	蔬菜 Vegetable	制种玉米 Corn for seed
单位面积净收益/(元/hm ²) Net income per unit area	[9 340.79, 16 092.25]	[18 244.94, 25 394.92]	[9 197.80, 13 055.07]	[59 763.50, 74 535.84]	[133 117.93, 175 500.95]	[68 304.71, 86 639.50]
惩罚系数/(元/hm ²) Penalty coefficient	[15 916.13, 22 667.59]	[25 550.87, 32 700.86]	[17 599.63, 21 456.89]	[63 416.46, 78 188.81]	[138 018.99, 180 402.01]	[72 505.62, 90 840.41]
各作物最低需求量/t Minimum demand for crops	[91 962.80, 102 586.50]	[20 517.30, 28 504.60]	[72 368.50, 82 069.20]	[2 995.52, 3 920.10]	[89 865.77, 149 776.29]	[360 354.38, 461 538.46]

3.3 种植结构优化决策结果及分析

将水量数据输入模型以后,由于水量有 A、B、C、D,4 种区间情况,故有 4 个计算结果。结合双区间理论和每个区间的特点,提出 3 种决策建议:对于 A 区间,选取的水量区间数值偏小,对农业可用水量是一种

比较保守预测,形成保守决策结果;对于 B、C 区间,使用它们单独进行决策都过于极端,故在此使用 0.5B+0.5C 的双区间组合形式,形成较为平均决策结果;对于 D 区间,选取的水量预测区间数值较大,对农业可用水量是一种比较乐观的预测,形成乐观决策(表 3)。

表 3 甘州区、临泽县、高台县主要农作物种植结构优化决策结果

Table 3 The main crop planting structure optimization results of three counties

hm²

作物 Crop	决策倾向 Decision tendency	水文年 Hydrological year					
		枯水年 Low flow year	较枯年 Partial low flow year	平水年 Normal flow year	较丰年 Partial high flow year	丰水年 High flow year	
小麦 Wheat	保守决策	[10 896.94, 12 155.77]	[10 896.94, 12 155.77]	[10 896.94, 12 155.77]	[10 896.94, 12 155.77]	[10 896.94, 12 155.77]	
	趋于平均决策	[10 896.94, 12 155.77]	[10 896.94, 12 155.77]	[10 896.94, 12 155.77]	[10 896.94, 12 155.77]	[10 896.94, 12 155.77]	
	乐观决策	[10 896.94, 12 155.77]	[10 896.94, 12 155.77]	[10 896.94, 12 155.77]	[10 896.94, 12 155.77]	[10 896.94, 12 155.77]	
粮食作物 Grain crop	薯类 Tuber crop	保守决策	[1 434.78, 1 993.33]	[1 434.78, 1 993.33]	[1 434.78, 1 993.33]	[1 434.78, 1 993.33]	[1 434.78, 1 993.33]
		趋于平均决策	[1 434.78, 1 993.33]	[1 434.78, 1 993.33]	[1 434.78, 1 993.33]	[1 434.78, 1 993.33]	[1 434.78, 1 993.33]
	乐观决策	[1 434.78, 1 993.33]	[1 434.78, 1 993.33]	[1 434.78, 1 993.33]	[1 434.78, 1 993.33]	[1 434.78, 1 993.33]	
玉米 Corn	保守决策	[8 630.34, 9 787.20]	[8 630.34, 9 787.20]	[8 630.34, 9 787.20]	[8 630.34, 9 787.20]	[8 630.34, 9 787.20]	
	趋于平均决策	[8 630.34, 9 787.20]	[8 630.34, 9 787.20]	[8 630.34, 9 787.20]	[8 630.34, 9 787.20]	[8 630.34, 9 787.20]	
	乐观决策	[8 630.34, 9 787.20]	[8 630.34, 9 787.20]	[8 630.34, 9 787.20]	[8 630.34, 9 787.20]	[8 630.34, 9 787.20]	

表3(续)

作物 Crop	决策倾向 Decision tendency	水文年 Hydrological year					
		枯水年 Low flow year	较枯年 Partial low flow year	平水年 Normal flow year	较丰年 Partial high flow year	丰水年 High flow year	
经济作物 Economic crop	油料 Oil crop	保守决策	[608.34, 796.10]	[608.34, 796.10]	[608.34, 796.10]	[608.34, 796.10]	[608.34, 796.10]
		趋于平均决策	[608.34, 796.10]	[608.34, 796.10]	[608.34, 796.10]	[608.34, 796.10]	[608.34, 796.10]
		乐观决策	[608.34, 796.10]	[608.34, 796.10]	[608.34, 796.10]	[608.34, 796.10]	[608.34, 796.10]
	蔬菜 Vegetable	保守决策	2 992.34	11 636.17	14 396.39	18 318.80	24 280.00
		趋于平均决策	3 900.30	12 616.77	16 952.49	20 874.90	24 280.00
		乐观决策	4 808.27	13 597.38	19 553.63	24 202.42	24 280.00
	制种玉米 Corn for seed	保守决策	[50 972.20, 57 645.77]	[50 972.20, 57 645.77]	[50 972.20, 57 645.77]	[50 972.20, 57 645.77]	[53 254.50, 58 910.19]
		趋于平均决策	[50 972.20, 57 645.77]	[50 972.20, 57 645.77]	[50 998.47, 57 645.77]	[51 326.86, 57 645.77]	[56 082.35, 61 631.76]
		乐观决策	[50 972.20, 57 645.77]	[50 972.20, 57 645.77]	[50 998.47, 57 645.77]	[51 326.86, 57 645.77]	[59 779.75, 64 353.33]
总种植面积 Total planting area	保守决策	[75 534.92, 85 370.51]	[84 178.76, 94 014.34]	[86 938.97, 96 774.56]	[90 861.38, 100 696.97]	[99 104.89, 109 093.16]	
	趋于平均决策	[76 442.89, 86 278.47]	[85 159.36, 94 994.95]	[89 521.35, 99 353.18]	[93 881.78, 103 638.78]	[102 432.73, 112 436.94]	
	乐观决策	[77 350.85, 87 186.44]	[86 139.96, 95 975.55]	[92 096.22, 101 931.81]	[96 745.00, 106 580.59]	[105 630.14, 115 780.72]	

可以看出,决策者对于农业可用水量预测不同,得到的优化方案也不同,预测可用水量越多,那么种植面积决策结果就越大,这符合实际情况。另外观察3种决策结果发现,当预测水量变化时,3种决策结果主要变化在于蔬菜与制种玉米面积变化,这是因为蔬菜与制种玉米单位面积效益较其他作物高。也就是说,现状情况下,蔬菜是该地区主要“弹性作物”,当水量不充足时,为保证粮食安全,可以优先减少蔬菜种植面积。当水量充足时,种植更多蔬菜会得到更大经济效益。当水量足够充分,蔬菜种植面积达到上限时,应当适当增加制种玉米种植面积以获得最大经济效益。

为检验决策结果的合理性,选取2014年种植现状与优化结果进行对比。查询《甘肃省水资源公报2014》^[15]可知2014年莺落峡来水21.9亿m³,接近丰水年水平。对比现状种植结构与优化结果,并计算2014年3县6种作物总收益对比3种优化决策结果,结果见表4。

根据优化决策建议,现状种植的小麦、油料、玉米种植面积需要进行缩减,而蔬菜种植面积现状符合优化结果,可以继续保持现状,薯类作物面积可以适当缩减,制种玉米种植面积需要增加,这样可以在满足粮食安全和社会稳定基础上增加种植这几种作物的收益。现状种植面积与乐观决策总种植面积相

表 4 现状水平年与优化结果比较

Table 4 Comparison of actuality year and optimization

hm²

作物 Crop	现状水平年 Actuality year	保守决策 Conservative decision	趋于平均的决策 Mean decision	乐观决策 Optimistic decision
小麦 Wheat	13 940.00	[10 896.94,12 155.77]	[10 896.94,12 155.77]	[10 896.94,12 155.77]
薯类 Tuber crop	1 993.33	[1 434.78,1 993.33]	[1 434.78,1 993.33]	[1 434.78,1 993.33]
玉米 Corn	26 680.00	[8 630.34,9 787.20]	[8 630.34,9 787.20]	[8 630.34,9 787.20]
油料 Oil crop	1 506.67	[608.34,796.10]	[608.34,796.10]	[608.34,796.10]
蔬菜 Vegetable	24 280.00	24 280.00	24 280.00	24 280.00
制种玉米 Corn for seed	46 586.67	[53 254.50,58 910.19]	[56 082.35,61 631.76]	[59 779.75,64 353.33]
总面积/hm ² Total area	114 986.67	[99 104.89,109 093.16]	[102 432.73,112 436.94]	[105 630.14,115 780.72]
总收益/亿元 Total benefit	[69.16,90.33]	[71.13,98.86]	[73.36,101.37]	[75.59,103.89]

近,但可以看出 3 种优化决策的效益均比现状方案更优,即按照优化后种植结构来进行种植可以在种植面积不增加的前提下实现更大经济效益。在保证同一耗水水平、地区粮食安全前提下,使用双区间两阶段随机规划模型得到的 3 种优化决策方案与现有的种植方案相比,经济效益有了明显提高。同时,也可以看出,决策者对水量预测越乐观,获得收益越大,但可能也会存在更大风险。

4 结 论

本研究使用双区间两阶段随机规划模型对研究区域进行种植结构优化得到以下结论:通过双区间两阶段随机规划模型得到的 3 种植结构优化方案即保守决策方案、趋于平均决策方案和乐观决策方案产生的经济效益比现状水平年种植结构下的经济效益分别提高[1.97,8.53]、[4.20,11.04]、[6.43,13.56] 亿元。

使用双区间两阶段随机规划进行地区种植结构优化不仅丰富了不同水文年决策情景,也为决策者在解决实际问题时提供了更多决策空间。将双区间两阶段随机规划应用于地区种植结构优化是缺水地区实现高效节水的有效方法。

参 考 文 献

[1] 潘丹,应瑞瑶. 中国水资源与农业经济增长关系研究:基于面板 VAR 模型[J]. 中国人口·资源与环境,2012,22(1):161-166
Pan D, Ying R Y. Relationship between water resource and

agricultural economic growth in China: Research based on panel VAR [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(1):161-166 (in Chinese)

- [2] 张端梅,梁秀娟,李钦伟,杨晓晗. 灌区多目标种植结构优化模型研究[J]. 人民黄河,2013,35(1):91-93
Zhang D M, Liang X J, Li Q W, Yang X H. Study on model with multi-objective optimization of planting structure in irrigation area [J]. *Yellow River*, 2013, 35(1): 91-93 (in Chinese)
- [3] 李建芳,粟晓玲. 基于虚拟水细分的多目标种植结构优化模型[J]. 灌溉排水学报,2013,32(5):126-129
Li J F, Su X L. A multi-objective optimization model for planting structure based on the subdivision of virtual water [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32(5): 126-129 (in Chinese)
- [4] 韩洪云,Jeff, Bennett. 21 世纪中国农业水资源利用[J]. 农业经济,2002(11):4-7
Han H Y, Jeff B. Chinese agricultural water resources utilization in 21 century[J]. *Agricultural Economy*, 2002(11): 4-7 (in Chinese)
- [5] Luo B, Li J B, Huang G H, Li H L. A simulation-based interval two-stage algorithm for long-term hydrothermal scheduling of multi-reservoir systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 361:38-56
- [6] Huang G H, Loucks D P. An inexact two-stage stochastic programming model for water resources management under uncertainty [J]. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 2000, 17(2):95-118
- [7] Lu H, Huang G H, He L. Inexact rough-interval two-stage stochastic programming for conjunctive water allocation problem[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 91(1):261-269
- [8] Li W, Li Y P, Li C H, Huang G H. An inexact two-stage water

- management model for planning agricultural irrigation under uncertainty [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97 (11):1905-1914
- [9] 程居富, 郭萍, 李莱. 双区间规划在单一作物水资源优化配置中的应用[J]. 节水灌溉, 2014(12): 48-53
Cheng J F, Guo P, Li M. Application of dual interval programming in water resources optimal allocation for single crop [J]. *Water Saving Irrigation*, 2014 (12): 48-53 (in Chinese)
- [10] Liu Z F, Huang G H, Nie X H, He L. Dual-interval linear programming model and its application to solid waste management planning [J]. *Environmental Engineering Science*, 2009, 26(6): 1033-1045
- [11] 杨献献. 面向生态的黑河中游水资源优化配置模型研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014
Yang X X. Optimal allocation model of water resource oriented ecology in the middle reaches of Heihe River [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014 (in Chinese)
- [12] 张掖市统计局, 国家统计局张掖调查队. 张掖统计年鉴 2009—2014[M]. 张掖: 张掖市统计局, 2015
Zhangye Statistics Bureau, National Bureau of statistics Zhangye Investigation Team. *Zhangye Statistical Year Book 2009—2014* [M]. Zhangye: Zhangye Statistics Bureau (in Chinese)
- [13] 牛最荣, 张世华. 甘肃省行业用水定额(修订本)[M]. 兰州: 甘肃人民出版社, 2012
Niu Z R, Zhang S H. *Water Quota in Gansu Province (Revised Edition)* [M]. Lanzhou: Gansu People Publishing Company, 2012 (in Chinese)
- [14] 中国营养学会. 中国居民膳食指南[M]. 北京: 中国营养学会, 2010
Chinese Nutrition Society. *Dietary Guidelines for Chinese Residents* [M]. Beijing: Chinese Nutrition Society, 2010 (in Chinese)
- [15] 甘肃省水利厅. 甘肃省水资源公报[M]. 兰州: 甘肃省水利厅, 2015
Gansu Provincial Water Resources Department. *Gansu Provincial Water Resources Bulletin* [M]. Lanzhou: Gansu Provincial Water Resources Department, 2015 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春