

# 基于两阶段随机规划方法的绿洲水资源优化配置

申梦阳<sup>1</sup>, 赵建平<sup>1</sup>, 桂东伟<sup>2</sup>, 冯新龙<sup>1</sup>

(1. 新疆大学数学与系统科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;

2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:**选取塔里木盆地南缘和田地区策勒绿洲作为典型研究区,以当前绿洲种植的核桃、红枣及石榴经济林种为重点研究对象,针对绿洲水资源灌溉系统中的不确定性和复杂性,引入概率密度函数和离散区间方法,构建区间两阶段模糊随机规划模型,对各经济林种在各灌季的配水目标进行优化,模拟分析不同林种在不同灌季的最优配置水量。结果表明:灌溉主要集中在夏季与秋季;在策勒河来水量不确定时,春季依然需要少部分水量进行灌溉,应优先灌溉红枣和石榴;夏秋时,主要对红枣与核桃灌溉,同时对石榴的灌溉面积进行动态调节,获得种植业最大收益,系统收益区间为 $[0.67 \times 10^8, 1.32 \times 10^8]$ 元。通过典型案例运用分析,显示该模型不仅充分考虑到不确定性因素对系统收益的影响,风险进行权衡并以区间形式给出优化结果从而获得较为科学的决策方案。

**关键词:**绿洲;水资源;动态灌溉;不确定分析;区间规划

**中图分类号:**TV213.9 **文献标志码:**A

## Study on the optimal allocation of oasis water resources based on the two-stages stochastic programming method

SHEN Meng-yang<sup>1</sup>, ZHAO Jian-ping<sup>1</sup>, GUI Dong-wei<sup>2</sup>, FENG Xin-long<sup>1</sup>

(1. College of Mathematics and System Sciences, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;

2. Chinese Academy of Sciences, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Cele National Station of Observation and Research for Desert-Grassland Ecosystem, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

**Abstract:** This research selected Cele Oasis in Hotan area located Southern margin of Tarim Basinas a typical study region, and the walnut, jujube and pomegranate as the main study objects, aimed at the uncertainty and complexity of the oasis water resources irrigation system, introduced the probability density function and the discrete interval method, structured the interval two-stages fuzzy stochastic programming model, carried out the optimization for the water allocation targets of diverse economic forest species in each irrigation season, simulated and analyzed the optimal water allocation for diverse forest species in different irrigation seasons. The research results showed that: The irrigation was mainly concentrated in summer and autumn. When the intake water volume in Cele River was uncertain, the jujube and pomegranate should be preferentially irrigated in spring; the jujube and walnut should be irrigated mainly in summer and autumn, at the same time the irrigation area of pomegranate should be dynamically adjusted to obtain the maximal incomes by planting, the interval was  $[0.67 \times 10^8 \text{ to } 1.32 \times 10^8]$  yuan. Through the typical case analysis, this model not only can be fully taken into account the impact of uncertain factors to the system incomes, but also the economic benefits and punishment risk can be balanced, also the optimal results by the form of interval can be given out, thereby the most scientific decision making scheme can be obtained and that can be effectively applied into the optimal allocation and management of oasis water resources.

**Key words:** oasis; water resources; dynamic irrigation; uncertainty analysis; interval programming

收稿日期:2017-03-08

修回日期:2017-04-20

**基金项目:**国家自然科学基金项目(U1603343, 41471031, 41501107);新疆自治区科技支撑计划项目“塔克拉玛干沙漠南缘骆驼刺植被修复技术与示范”(201433114);新疆维吾尔自治区自然科学基金(2015211C289)

**作者简介:**申梦阳(1993-),男,河南项城人,硕士研究生,研究方向为绿洲水资源优化配置。E-mail:smy3320@126.com

**通讯作者:**桂东伟(1977-),男,河南确山人,博士,主要从事荒漠环境研究。E-mail:guidwei@163.com

农业作为水资源消耗主体,针对其水资源的科学分配与统筹优化配置一直是相关学者关注和研究的焦点<sup>[1-2]</sup>。绿洲作为干旱区人们生产生活的重要载体,在其水资源的开发利用过程中,农业水资源利用量更是超过绿洲总用水量的 95% 以上<sup>[3]</sup>。当前由于人口和经济压力,绿洲扩张进程加剧,大规模土地被开发利用为农业用地,导致水资源矛盾日益突出,对绿洲生态安全与可持续发展带来严重挑战<sup>[4-6]</sup>。

塔里木盆地南缘作为新疆乃至我国绿洲分布的重要区域,近些年来,绿洲新垦殖的土地种植了经济价值相对较高的核桃、红枣、石榴等林果,而且老绿洲的小麦、玉米和棉花等传统农作物也逐渐转变为林果种植,目前塔南和田地区林果种植面积就达到总种植面积的 60% 以上,而且这种趋势仍然在加剧。种植结构的改变,为绿洲水资源的再分配和管理提出了新的挑战。因此,针对新形势下种植结构开展相应的水资源优化配置研究,成为当前迫切的现实需求。

在农业水资源的优化配置研究中,近些年随着研究的不断深入,出现了多种优化配置方法。例如基于最大化水资源净效益、博弈均衡论及土壤水分动态模拟和作物水分生产函数等方法构建的水资源优化配置模型<sup>[7-9]</sup>,这些方法虽然可以为管理者提供决策方案,但对系统进行了简化。为了提高模型的适用性,人工鱼群算法、粒子群算法、加速遗传算法、蚁群-粒子群混合算法等启发式优化算法应用于水资源优化配置中并得到良好的应用<sup>[10-13]</sup>,而在此基础上,如多目标混沌优化算法、多目标遗传算法、多级多目标模糊优选评价等水资源优化配置模型等也得到发展<sup>[14-17]</sup>,但以上研究并未重点考虑农业水资源管理系统的太多不确定性,导致不能很好地反映实际问题。

水资源配置系统受多种不确定性影响,如天气、降水、温度、市场状况、种植模式和资源可利用性。这使得以往常规的确定性优化方法难以应用于水资源配置系统。绿洲水资源的合理分配利用需要基于水资源补给状况,结合农业发展特征(如种植结构),提高用水效率,以期实现水资源利用价值的最大化。由于绿洲水资源调度系统存在着大量不确定性,如水源可供水量、种植物需水量的不确定性;降水量、规划初期储水量的不确定性;种植物价格变化的不确定性等,这些不确定性因素共同构成了水资源调度系统的复杂性<sup>[18]</sup>。而如何有效处理不确定性便成了绿洲水资源优化配置的重点研究对象。

针对系统中的不确定性和复杂性研究中,两阶段随机规划方法应用最为广泛,如区间两阶段随机规划模型、区间模糊多阶段方法、区间两阶段随机二次规划模型等<sup>[19-21]</sup>。在地下水和地表水的联合调度及不确定条件下的水资源分配研究中<sup>[22-23]</sup>,两阶段随机规划方法得到大量应用,同时联合概率、离散区间等理论相继应用于两阶段随机规划模型中<sup>[24-26]</sup>。然而,针对绿洲水资源补给与利用过程中的不确定性和复杂性,相关水资源优化配置研究仍然缺乏;而在两阶段规划方法的基础上,如何建立规划模型并有效地解决其不确定性问题,需要通过具体案例开展相关研究。

本研究依托策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站(下简称策勒站)长期监测资料,选取塔里木盆地南缘中部的策勒绿洲为典型研究区,基于策勒绿洲当前种植结构特征,首先针对绿洲水资源系统中的不确定性,构建灌区多林种、多时期配水模型;其次,模型以种植业系统最大收益为目标函数,以两阶段线性规划方法为基础,建立适宜于绿洲水资源管理的区间两阶段模糊随机规划模型;最后,利用概率密度函数和离散区间两种方法来解决不确定性问题,最终为绿洲管理者提供最为科学的决策方案。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 研究区概况

策勒绿洲位于塔克拉玛干沙漠南缘、昆仑山北麓中段,隶属和田地区策勒县行政区(35°17'55"~39°30'00"N,80°03'24"~82°10'34"E),属于典型的暖温带干旱气候,绿洲区域年均降水量 35.1 mm,年均蒸发量 2 595.3 mm,干燥度 20.8;发源于昆仑山的策勒河是绿洲的唯一外源补给河流,年均径流量为  $1.27 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;常年多风,风向以西北风为主,昼夜温差较大,年均温日较差在 15℃ 以上<sup>[27]</sup>。绿洲的东、西部为自然植被所包围,南部与流动沙丘及戈壁相连,属于独特的荒漠-绿洲生态系统,土壤以风沙土为主<sup>[28]</sup>。

### 1.2 数据来源及分析

农产品市场价格来自新疆统计年鉴<sup>[29]</sup>特色果林种植概况数据,我们选取近五年的市场价格作为参考。策勒河径流量资料来自和田水文局的近六十年的监测数据,时间跨度为 1956 年 1 月 1 日到 2015 年 12 月 31 日,核桃、红枣及石榴需水量数据来自策勒站的长期监测数据。

策勒绿洲在 2015 年灌溉面积 8 667 hm<sup>2</sup>,其中

特色果林占了主要部分。由于近年来策勒绿洲大力发展特色果林产业,其中尤以核桃、矮化红枣及石榴为主,而且在未来几年内绿洲的特色果林种植面积仍会增加,预计达到 6 705 hm<sup>2</sup>,因此本研究将重点对当前主要种植的核桃、红枣及石榴开展水资源优化配置研究。此外,由于策勒河地表径流为绿洲主要灌溉水源,尽管地下水是农业用水的重要补充,但考虑到当前绿洲地下水位的下降及地下水的研究以优化抽水井的数量与位置为主要目的,在后续的研究中将涉及<sup>[30]</sup>,本研究从水资源安全及减少研究的不确定性角度,只针对策勒河径流这一地表水进行水资源优化配置研究,而且当前由于绿洲扩张和农业用水增加,策勒河水基本上都全部用于绿洲,因此如何对地表水分配实际上也是当前绿洲水资源分配的主要问题。同时,考虑到渠道运输的损耗、自然蒸发以及防护林的灌溉必须满足,限定策勒河进入绿洲径流的 70% 水量可用于特色果林灌溉分配。关于农业种植物的价格预测则是在恩格尔系数和居民消费指数变化趋势平稳的基础上开展。

### 1.3 模型建立及求解

对于大多数农业规划系统来说,都以实现经济利益最大化为主要目的,比如系统的最大化收益或系统最小化成本花费。本研究也以实现种植业系统的最大化收益为目的,建立具体目标函数如下:

$$\max f^{\pm} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J NB_{ij}^{\pm} ST_{ij}^{\pm} - \sum_{j=1}^J E \left[ \sum_{i=1}^I C_{ij}^{\pm} SD_{ijQ}^{\pm} \right] \quad (1)$$

式中, $E$ 表示随机变量的期望值; $SD$ 表示未满足预先配水目标时的未灌溉面积; $f$ 表示系统总收益;上角“-”表示区间参数的下限值,上角“+”表示区间参数上限值。水源可用水量为策勒河来水量,为随机变量。根据近年来的监测数据,将不同水文年下的策勒河来水量 $q_k$ 视为离散概率分布,并假设不同水文年份发生的概率为 $p_k$ 。 $k$ 表示预测年的不同的流量水平( $k=1,2,\dots,K$ ), $k=1$ 表示预测年净来水最少,为一般干旱年,缺水最大; $k=2$ 表示预测年来水适中,为平水年,缺水较少;当 $k=K$ 时表示净来水最多,为丰水年,缺水最少。而 $p_k$ 满足

$$\sum_{k=1}^K p_k = 1, \quad 0 \leq p_k \leq 1 \quad (2)$$

则有

$$\sum_{j=1}^J E \left[ \sum_{i=1}^I C_{ij}^{\pm} SD_{ijQ}^{\pm} \right] = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K p_k C_{ij}^{\pm} SD_{ijk}^{\pm} \quad (3)$$

因此,模型的目标函数可表示为

$$\max f^{\pm} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J NB_{ij}^{\pm} ST_{ij}^{\pm} - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K p_k C_{ij}^{\pm} SD_{ijk}^{\pm} \quad (4)$$

根据交互式算法,将原始模型分解为 2 个子模型,分别为灌区水资源系统收益上限模型和下限模型,由于目标函数是系统收益最大值,因此其上限子模型为

$$\max f^+ = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J NB_{ij}^+ ST_{ij}^+ - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K p_k C_{ij}^- SD_{ijk}^- \quad (5)$$

约束条件

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J W_{ij}^- (ST_{ij}^- - SD_{ijk}^-) &\leq Q_{jk}^+ + R_{(j-1)k}^+, \quad \forall j, k \\ R_{(j-1)k}^+ &= Q_{(j-1)k}^+ - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J W_{i(j-1)}^- (ST_{i(j-1)}^- - SD_{i(j-1)k}^-) + R_{(j-2)k}^+, \quad \forall j, k \\ 0 &\leq SD_{ijk}^- + ST_{ijmin}^+ \leq ST_{ij}^+ \leq ST_{ijmax}^+, \quad \forall i, j, k \\ SD_{ijk}^- &\geq 0, \quad \forall i, j, k \end{aligned} \right. \quad (6)$$

式中, $SD_{ijk}^-$ 为决策变量,根据线性规划方法求解上限子模型,得到 $SD_{ijkopt}^-$ 和 $f_{opt}^+$ 。

符合目标函数的下限子模型如下

$$\max f^- = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J NB_{ij}^- ST_{ij}^- - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K p_k C_{ij}^+ SD_{ijk}^+ \quad (7)$$

约束条件

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J W_{ij}^+ (ST_{ij}^+ - SD_{ijk}^+) &\leq Q_{jk}^- + R_{(j-1)k}^-, \quad \forall j, k \\ R_{(j-1)k}^- &= Q_{(j-1)k}^- - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J W_{i(j-1)}^+ (ST_{i(j-1)}^+ - SD_{i(j-1)k}^+) + R_{(j-2)k}^-, \quad \forall j, k \\ 0 &\leq SD_{ijk}^+ + ST_{ijmin}^- \leq ST_{ij}^- \leq ST_{ijmax}^-, \quad \forall i, j, k \\ SD_{ijk}^+ &\geq 0, \quad \forall i, j, k \end{aligned} \right. \quad (8)$$

式中, $SD_{ijk}^+$ 为决策变量,根据线性规划方法求解上限子模型,得到 $SD_{ijkopt}^+$ 和 $f_{opt}^-$ 。

以上模型中的符号意义: $i$ :需要灌溉的作物种类, $i=1,2,3$ 分别表示红枣、核桃和石榴; $j$ :年内不同灌溉季, $j=1,2,3,4$ 分别表示春、夏、秋和冬; $k$ :水文年, $k=1,2,3$ 分别表示一般干旱年、平水年和丰水年; $q_k$ :不同水文年的策勒河来水量( $10^4 \text{ m}^3$ ); $P_k$ :不同水文年发生概率; $W_{ij}$ :单位面积林种 $i$ 在 $j$ 时期的预先灌水量( $10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ); $NB_{ij}$ :林种 $i$ 在 $j$ 时期

满足预先灌水目标,单位面积的收益值(元· $\text{hm}^{-2}$ ); $C_{ij}$ :林种*i*的预先灌水目标未满足时,单位面积缺水量的惩罚系数且 $C_{ij} > NB_{ij}$ (元· $\text{hm}^{-2}$ ); $SD_{ijk}$ :在*k*年份时,未达到预先灌水目标时,林种*i*在*j*时期未灌溉面积( $\text{hm}^2$ ); $Q_{jk}$ :策勒河在*k*年份,*j*时期的来水量( $10^4\text{m}^3$ ); $R_{(j-1)k}$ :上游水库储水量,水库在*k*年份*j*-1时期的储水量( $10^4\text{m}^3$ ); $ST_{ijmin}$ , $ST_{ijmax}$ :预先灌溉面积的最小值和最大值( $\text{hm}^2$ )。

由此可以求得原始模型的最优解为

$$f_{opt}^{\pm} = [f_{opt}^{-}, f_{opt}^{+}] \quad (9)$$

$$SD_{ijkopt}^{\pm} = [SD_{ijkopt}^{-}, SD_{ijkopt}^{+}] \quad (10)$$

上式中, $f_{opt}^{\pm}$ 表示系统最大收益, $SD_{ijkopt}^{\pm}$ 表示系统优化结果,通过 MATLAB R2012b 进行编程可以计算得到以上变量结果。不同时期的绿洲最优供水目标可由 $S_{ijkopt}^{\pm} = ST_{ijk}^{\pm} - SD_{ijkopt}^{\pm}$ 得到,由此得出水资源进行合理分配的依据。

#### 1.4 模型参数

由于林果业种植面积增加导致水资源压力增加,本研究为有效地分配水资源采用分季灌溉的方式,一方面缓解策勒绿洲地下水压力,平衡惩罚风

险与效益之间关系,使系统受益最大;另一方面通过收益区间变化、最优配水目标值和缺水量,了解种植结构是否合理,为绿洲管理者提供合理的分配方案和决策。

绿洲内主要种植果林为石榴、红枣和核桃,根据策勒站长期监测资料并结合近年来大力发展特色果林产业的政策,获取单位面积的灌水量,表示为离散区间形式,并对未来几年各林种的种植面积进行预测,见表 1。其中单位面积最小灌水量和最大灌水量分别是绿洲可以满足的最小量和最大量。基于策勒站长期监测数据,石榴、红枣和核桃在不同灌季的需水比例分别为 0.25、0.60、0.15、0;0.15、0.65、0.20、0;0.30、0.60、0.10、0。根据不同生长阶段,各林种对水的敏感性,水资源各个时期的输出系数分别为 0.20、0.70、0.10、0;0.15、0.70、0.15、0;0.20、0.60、0.20、0<sup>[31]</sup>。

根据策勒 c 站多年监测策勒河的径流量数据,丰水年、平水年和一般干旱年出现的概率分别为 0.3、0.6 和 0.1。在不同年份下,各个时期内来水量以离散区间的形式表现,见表 2。

表 1 绿洲各经济林种植面积及单位面积灌溉用水量

Table 1 The planting areas and irrigation water volume per unit area of each economic forest in oasis

林种 Economic forest	种植面积 Planting area/ $\text{hm}^2$	单位面积灌水量 Irrigation volume per unit area/ $(10^3\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	单位面积最小灌水量 Minimal irrigation volume per unit area/ $(10^3\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	单位面积最大灌水量 Maximal irrigation volume per unit area/ $(10^3\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$
石榴 Pomegranate	1041.7	[12.8, 14.3]	[12.0, 12.6]	[14.3, 15.0]
红枣 Jujube	3347.6	[10.0, 11.3]	[9.0, 9.8]	[11.4, 12.0]
核桃 Walnut	2315.4	[10.2, 11.0]	[9.0, 9.9]	[11.2, 12.0]

注:灌区经济林种植面积及用水资料由策勒站提供,灌水量表示为区间数。

Note: The data of economic forest areas and irrigation water volumes were provided by Cele Station; the irrigation water volume were expressed by the interval.

表 2 不同预测年的各时期可用水量

Table 2 The available water volume for each period in different forecast years

水文频率 Hydrologic frequency	概率 Probability	可用水量 Available water/ $(10^4\text{m}^3)$			
		春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
L	0.3	[212.6, 485.2]	[1032.5, 3563.0]	[156.2, 627.4]	[102.1, 473.6]
M	0.6	[1405.1, 1673.5]	[4733.3, 7497.6]	[1406.0, 1918.4]	[873.5, 1180.6]
H	0.1	[3042.2, 3707.2]	[9479.7, 1443.6]	[2103.3, 2992.4]	[1203.5, 1340.0]

注:可用水量资料主要来自于和田市水文局,其中 L、M、H 分别指代一般干旱期、平水期和丰水期,各时期的可用水量表示为区间形式。下同。

Note: The amount of water available data are mainly from Hotan Hydrology Bureau, in which the L, M, H refer to the general dry period, normal water period and high water period respectively, the available water in each period is expressed as interval form. The same below.

根据计算,三种经济林种的收益区间分别为 $[51.7 \times 10^3, 53.2 \times 10^3]$ 、 $[49.5 \times 10^3, 51.0 \times 10^3]$ 、 $[46.4 \times 10^3, 47.8 \times 10^3]$ 元· $\text{hm}^{-2}$ 。如果不进行灌溉,则会造成相应的损失,且损失要高于当年的收益。缺水惩罚系数通过建立种植物不同生育阶段水资源优化配置模型计算求得<sup>[32]</sup>。绿洲内三种经济林如果未能进行灌溉,则造成的缺水惩罚系数区间分别为

$[53.4 \times 10^3, 55.5 \times 10^3]$ 、 $[51.0 \times 10^3, 52.8 \times 10^3]$ 、 $[47.8 \times 10^3, 49.6 \times 10^3]$ 元· $\text{hm}^{-2}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 水资源优化配置方案

不同时期的绿洲最优供水目标通过 $S_{ijkopt}^{\pm} = ST_{ijk}^{\pm} - SD_{ijkopt}^{\pm}$ 得到,预测年份各时期的缺水量根据子模

型的计算成果得到,进而求得预测年各时期的最优配置结果,表示为区间形式,见表3,同时可以得到系统最大收益区间为 $[0.67 \times 10^8, 1.32 \times 10^8]$ 元。

表3 各经济林种在不同水文年各时期的灌溉面积/hm<sup>2</sup>

Table 3 Irrigated areas of each economic forest in diverse period in different hydrologic year

时期 Period	水文频率 Hydrologic frequency	石榴 Pomegranate	红枣 Jujube	核桃 Walnut
春季 Spring	L	[693.8, 1041.7]	[3347.6, 3347.6]	[0, 623.8]
	M	[763.7, 1041.7]	[3347.6, 3347.6]	[0, 873.6]
夏季 Summer	H	[823.1, 1041.7]	[3347.6, 3347.6]	[0, 1064.7]
	L-L	[0, 509.6]	[1326.9, 3347.6]	[2315.4, 2315.4]
秋季 Autumn	M-M	[0, 638.2]	[1998.4, 3347.6]	[2315.4, 2315.4]
	H-H	[0, 802.7]	[2427.5, 3347.6]	[2315.4, 2315.4]
	L-L-L	[0, 2.3]	[851.8, 3347.6]	[2315.4, 2315.4]
	M-M-M	[0, 56.3]	[1264.0, 3347.6]	[2315.4, 2315.4]
	H-H-H	[0, 291.0]	[1746.2, 3347.6]	[2315.4, 2315.4]

春季时,应该对红枣全部种植面积进行灌溉,而石榴在一般干旱年时的最佳灌溉面积区间为 $[693.8, 1041.7]$ hm<sup>2</sup>,平水年时的最佳灌溉面积区间为 $[763.7, 1041.7]$ hm<sup>2</sup>,丰水年时的最佳灌溉面积区间为 $[823.1, 1041.7]$ hm<sup>2</sup>,对于核桃在一般干旱年的最佳灌溉面积区间为 $[0, 623.8]$ hm<sup>2</sup>,平水年时的最佳灌溉面积区间为 $[0, 873.6]$ hm<sup>2</sup>,丰水年时的最佳灌溉面积区间为 $[0, 1064.7]$ hm<sup>2</sup>。

对一般干旱年、平水年和丰水年,夏季各作物的灌溉面积进行分析。为了达到最高收益,在一般干旱年,石榴的最佳灌溉面积区间为 $[0, 509.6]$ hm<sup>2</sup>,红枣的最佳灌溉面积区间为 $[1326.9, 3347.6]$ hm<sup>2</sup>,对核桃全部面积进行充分灌溉。在平水年,石榴的最佳灌溉面积区间为 $[0, 638.2]$ hm<sup>2</sup>,红枣的最佳灌溉面积区间为 $[1998.4, 3347.6]$ hm<sup>2</sup>,对核桃全部面积进行充分灌溉。在丰水年,石榴的最佳灌溉面积区间为 $[0, 802.7]$ hm<sup>2</sup>,红枣的最佳灌溉面积区间为 $[2427.5, 3347.6]$ hm<sup>2</sup>,对核桃全部面积进行充分灌溉。

在秋季时,仅对一般干旱年、平水年和丰水年的情况进行分析。为了使系统达到最高的经济效益,在一般干旱年,石榴的最佳灌溉面积区间为 $[0, 2.3]$ hm<sup>2</sup>,红枣的最佳灌溉面积区间为 $[851.8, 3347.6]$ hm<sup>2</sup>,核桃进行全部面积充分灌溉。在平水年,石榴的最佳灌溉面积区间为 $[0, 56.3]$ hm<sup>2</sup>,红枣的最佳灌溉面积区间为 $[1264.0, 3347.6]$ hm<sup>2</sup>,核桃进行全部面积充分灌溉。在丰水年,石榴的最佳灌溉面

积区间为 $[0, 291.0]$ hm<sup>2</sup>,红枣最佳灌溉面积区间为 $[1746.2, 3347.6]$ hm<sup>2</sup>,核桃全部面积进行充分灌溉。

考虑策勒河冬季来水量极少,同时石榴、红枣和核桃在冬季基本不需要额外的灌溉水,故在冬季时不对经济林进行额外用水配置。

## 2.2 水资源优化结果分析

由于策勒河的主要来水期集中在夏秋时期,春季时,供水量相对较少,为了保障系统的最大收益,在春季应优先灌溉红枣和石榴,对核桃的灌溉面积进行适当调整。

策勒河洪水集中于夏季,而石榴等经济林种也是在此时需水量最大,但相比于核桃和红枣,未能得到更大产值,使得绿洲管理者在决策时,主要调整石榴的灌溉面积。

通过优化结果可以看出,秋季时,核桃和红枣的产值较高,虽然石榴的惩罚系数高于两者,但由于两者在此期间的需水量少于石榴,故管理者在决策时仍要优先灌溉核桃和红枣。由于灌溉水源来自于策勒河,蓄水工程很难有储存水量,因此导致在流量水平较低时,无法进行人为调控,使得石榴在此期间未能得到足够的灌溉。

图1和图2分别表示各林种在各灌季灌溉面积的上限和下限。可以看出,由于红枣的产值比较高,建议优先灌溉红枣;而石榴由于需水量更大,但产值并未有较大提高,因此当流量不确定时应主要对其灌溉面积进行动态调节,由此获得较大的收益。该结果提示我们,即干旱年份应在调整种植结构以减少水资源的消耗量和保证种植物产量之间寻找一个平衡点,提高经济收益的同时保证资源的可持续利用,实现绿洲水资源可持续发展。

值得提出的是,考虑到策勒绿洲比较适合种植石榴,相比于全疆其它地区,策勒绿洲的单位面积产值较高,应适当提高石榴的灌溉面积。近年来,核桃的市场价格不断上涨,建议适当提高核桃的灌溉面积,这样才会更加符合生产实际,使得整个绿洲获得更大经济收益。

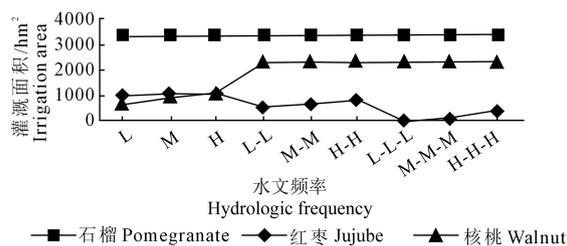


图1 各经济林种不同灌季灌溉面积上限  
Fig.1 The upper limitation of irrigated areas for each economic forest in different irrigation seasons

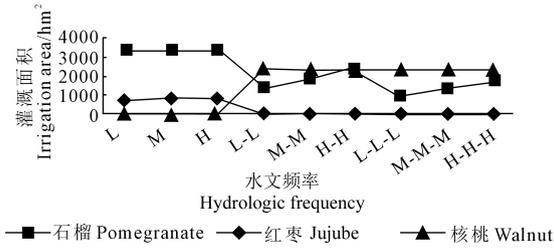


图 2 各经济林种不同灌季灌溉面积下限

Fig.2 The lower limitation of irrigated areas for each economic forest in different irrigation seasons

### 3 结论与讨论

本研究在已有工作的基础上,建立区间不确定性数值模型,对策勒绿洲农业水资源配置进行了研究,所有结果均以区间数的形式给出,这表明模型对区间参数的输入比较敏感,可以较好地表达不确定信息,而区间两阶段随机规划方法将概率密度函数和区间规划结合起来表示系统的不确定性,扩展了现有的两阶段随机规划和区间规划,更精确地解决了绿洲水资源系统的不确定性问题。而将研究期分为春、夏、秋、冬 4 个灌季,计算了预测年绿洲在各灌季的可分配水量,并以此为输入数据,通过建立区间两阶段随机规划模型将水资源分配到不同的农业种植物,确保了系统的收益最大,为策勒绿洲的水资源规划与管理提供精准的决策依据。

顺利开展绿洲水资源优化配置方面的研究工作,需要考虑绿洲的实际情况,全面的、长期的、高质量的监测数据,是准确了解绿洲实际情况的保障<sup>[33]</sup>。不能局限于现有的方法,需要结合其它学科的优势进行发展,实现多学科交叉与配合<sup>[34]</sup>。在今后的研究中,需要结合具体地区的农业种植,对种植物的重要性进行综合考虑,赋予相应的权重,同时加入生态效益,构建多目标模型并将其与两阶段随机规划模型与多目标模型结合起来,建立更为科学的数值模型。在保证地下水安全的条件下,实现地表水与地下水的联合优化调度配置;同时全方位的(如施肥、耕作、灌溉方式等)、多层面的(如不同种植物间的套种及种植时间上的衔接等)对绿洲中不同种植物的水资源优化配置进行研究,以期得到更为细致的、更具有代表性的模型,这也是绿洲水资源管理下一步的方向和重点。

#### 参考文献:

[1] 桂东伟,吕光辉,秦艳. 用虚拟水理论探讨干旱区生态用水问题[J]. 干旱区研究, 2007, 24(4):466-469.  
 [2] Liu D, Chen X, Lou Z. A Model for the Optimal allocation of water resources in a Saltwater Intrusion Area: A case study in

Pearl River Delta in China [J]. Water Resources Management, 2010, 24(1):63-81.

[3] 樊自立,禹朴家,乔木,等. 绿洲土地整合是增加耕地和保护生态的重要措施——以新疆玛纳斯河流域为例[J]. 干旱区地理, 2012, 35(5):772-777.  
 [4] 樊自立,吴世新,吴莹,等. 新中国成立以来的新疆土地开发[J]. 自然资源学报, 2013, (5):713-720.  
 [5] 任晓. 塔里木盆地南缘 2000—2013 年人工绿洲扩张过程研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2015.  
 [6] 桂东伟,雷加强,曾凡江,等. 绿洲农田土壤粒径分布特征及其影响因素分析——以策勒绿洲为例[J]. 土壤, 2011, 43(3):411-417.  
 [7] 邵东国,贺新春,黄显峰,等. 基于净效益最大的水资源优化配置模型与方法[J]. 水利学报, 2005, 36(9):1050-1056.  
 [8] 彭祥,胡和平. 黄河水资源配置博弈均衡模型[J]. 水利学报, 2006, 37(10):1199-1205.  
 [9] 霍军军,尚松浩. 基于模拟技术及遗传算法的作物灌溉制度优化方法[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4):23-28.  
 [10] 高玉芳,张展羽. 混沌人工鱼群算法及其在灌区优化配水中的应用[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6):7-11  
 [11] 陈晓楠,段春青,邱林,等. 基于粒子群的大系统优化模型在灌区水资源优化配置中的应用[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3):103-106.  
 [12] 余艳玲. 灌区水资源优化配置模型的建立及应用[J]. 云南农业大学学报, 2010, 25(5):703-706.  
 [13] 李滕,解建仓,杨柳. 基于蚁群-粒子群混合算法的水资源优化配置研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2015, 43(1):229-234.  
 [14] 黄显峰,邵东国,顾文权,等. 基于多目标混沌优化算法的水资源配置研究[J]. 水利学报, 2008, 39(2):183-188.  
 [15] 冯峰,许士国. 灌区水资源综合效益的改进多级模糊优选评价[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7):56-61.  
 [16] 粟晓玲,康绍忠. 石羊河流域多目标水资源配置模型及其应用[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11):128-132.  
 [17] 郑海利,鞠勤国,刘美侠,等. 基于多目标遗传算法的水资源优化配置[J]. 东北水利水电, 2011, 29(5):54-57.  
 [18] 曾雪婷,李永平,乔祥利,等. 基于不确定性规划的生态灌区水资源配置模型及运用[C]//中国水利学会 2014 年学术年会文集.天津:中国水利学会, 2014.  
 [19] Lu H W, Huang G H, Zeng G M, et al. An inexact two-stage fuzzy-stochastic programming model for water resources management [J]. Water Resources Management, 2008, 22(8):991-1016.  
 [20] Li Y P, Huang G H, Yang Z F, et al. IFMP: Interval-fuzzy multistage programming for water resources management under uncertainty [J]. Resources Conservation and Recycling, 2008, 52(5):800-812.  
 [21] Li Y P, Huang G H. Two-stage planning for sustainable water quality management under uncertainty [J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(8):2402-2413.