

[文章编号] 1003—4684(2020)01-0029-04

# 宣化区农业水资源系统仿真与优化配置

张思俊, 何 莉, 吴 霜, 杜 煜, 张照奎

(湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 针对农业水资源配置不当造成的水资源供需矛盾与水质污染问题,分析宣化区农业供用水结构,建立系统动力学模型进行仿真预测,分析敏感因素。随后考虑水质约束,以农业水资源供需差额最小、农业总产值最大为目标建立多目标规划模型,对 2016 年数据进行优化,验证模型有效性,再对 2020 年农业水资源进行优化配置。结果表明:优化后水资源供需差额减少 697.18 万  $\text{m}^3$ ,洋河 COD 浓度降低 2.75%,农业总产值增长率维持在 10.77%,优化方案减轻地区水质污染,缓解农业用水供需矛盾,可为地区水资源合理利用与农业发展提供参考依据。

[关键词] 宣化区; 农业; 水资源; 仿真; 优化

[中图分类号] TV21 [文献标识码] A

宣化区位于河北省张家口市东南,为冀西北坝下杂粮主产区。境内干旱少雨,“缺水”是制约全区旱作区农业生产发展的“瓶颈”<sup>[1]</sup>。近年来区内最大常年性河流洋河由于生产、生活污水不断排入导致水质污染,河下游是冬奥会期间滑雪场馆的重要后备供水水源地<sup>[2]</sup>,对宣化区进行农业水资源优化配置意义重大。张珊等<sup>[3]</sup>构建以水土资源限制为约束的多目标模型进行区域农业水资源配置。王学全等<sup>[4]</sup>构建水资源优化配置系统动力学模型,对青海湖流域水资源进行优化配置。结合模拟技术(SD)与多目标规划(MOP)方法,以宣化区为研究对象,建立农业水资源系统动力学模型,进行仿真预测并确定出敏感参数。在此基础上,考虑水质水量为约束,农业水资源供需差额最小与农业总产值最大为目标,建立多目标规划模型,得出宣化区农业水资源优化配置方案,为宣化区的水资源合理利用与农业发展提供参考依据。

## 1 研究方法

系统动力学(SD)是通过系统分析利用变量之间反馈关系对未来趋势进行预测的方法<sup>[5]</sup>,但难以优化敏感参数。多目标规划(MOP)能够兼顾多个目标优化决策变量。将 SD 与 MOP 相结合,可功能互补。具体步骤如下:

1)确定系统边界,建立 SD 模型。根据研究对象及目标来确定系统边界,分析影响宣化区农业水

资源系统的影响因素及其反馈关系,利用仿真软件 Vensim 构建农业水资源系统流程图。

2)参数估计并分析敏感参数。采用回归分析、表函数、取平均值等多种方法确定系统参数取值。运行模型并进行历史检验,直到模型具有良好的鲁棒性与可信度,再分析挑选出符合建模目的及背景的敏感参数。

3)构建 MOP 模型并求解。以敏感参数为决策变量,引入水质水量约束,综合考虑农业水资源供需平衡与农业经济效益最大化等目标,建立农业水资源 MOP 模型,并利用 Matlab 非线性规划工具箱求解。

4)优化方案仿真。将 MOP 模型优化解代入 SD 模型,得到优化后的农业水资源配置方案。

## 2 SD 仿真模型的构建

### 2.1 系统结构与主要变量分析

以张家口市宣化区的行政界线为空间边界;以 2006~2030 年作为时间边界,2016 年为现状年,目标年设为 2020 年,仿真预测的年限设为 2017—2030 年,仿真时间步长设定为 1 年。模型数据来源主要为《张家口市统计年鉴》(2006—2016),《官厅水库生态安全调查与评估报告》(2014),2006—2016 年张家口市水资源公报以及 2006—2016 年张家口市国民经济和社会发展统计公报、《张家口市农业发展“十三五”规划》等。

[收稿日期] 2019—09—22

[基金项目] 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX0710100308)

[第一作者] 张思俊(1993—),男,湖北孝感人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为水资源优化配置

[通信作者] 何 莉(1980—),女,湖北工业大学教授,研究方向为水资源优化配置

根据对地区农业供水结构的分析,将农业水资源系统划分为3个子系统,即水资源供需子系统、水污染子系统和农业经济子系统,水资源供需子系统考虑农业可用水量及农业用水量对系统的影响,总种植面积与牲畜存栏总量为状态变量;水污染子系统考虑农业污染即种植业、畜牧业所产生的COD入河量,其他如工业、生活所产生的COD入河量处理为常数或表函数,洋河COD负荷量为状态变量;农业经济子系统考虑种植业、畜牧业,而渔业、林业产值份额小不予考虑,各作物及牲畜单位用水效益处理成表函数。依据各子系统因果关系,运用Vensim软件构建农业水资源系统动力学流程图(图1)。

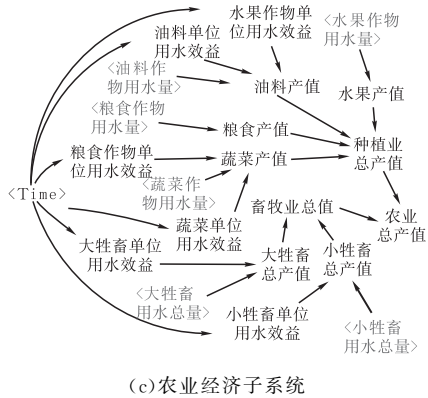
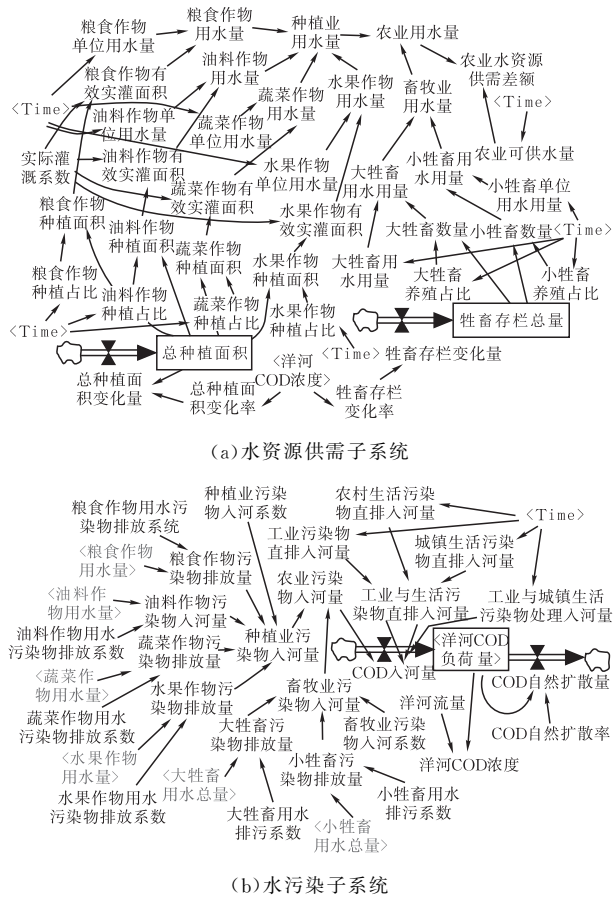


图1 农业水资源系统动力学模型流程图

2.2 参数设定及模型检验

图1中,模型状态变量如总种植面积、牲畜存栏总量、洋河COD负荷量等的初始值采用2006年的真实值。常量如粮食作物用水排污系数、大牲畜用水排污系数、种植业污染物入河系数等由历史数据取平均值得到。其他随时间变化的变量如总种植面积变化率、粮食作物单位用水效益(粮食作物单位用水量、粮食种植面积占比)等变量运用回归分析法或表函数法确定其取值。

以2006年作仿真起始年,选择种植业用水量、畜牧业用水量、种植业总产值、畜牧业总产值等指标作为观测变量进行历史性检验,以考察模型的有效性与其可信度。运行模型后,将观测变量2006年、2009年、2012年、2016年的仿真值与实际值进行比较见表1,可以看到,各变量的仿真值与实际值误差均在10%以内,模型具有较好的鲁棒性和可信度,可对水资源系统进行分析以及相关的预测。

2.3 敏感性分析

模型的敏感性分析是指改变模型参数取值,通过比较改变前后运行结果,分析参数对模型的影响。确定敏感参数需要以政策分析为指导,通过分析建模目的、研究背景、系统的因果关系等方面内容来选定<sup>[6]</sup>。

表1 历史检验

年份	种植业用水量			种植业总产值		
	真实值/万 m <sup>3</sup>	仿真值/万 m <sup>3</sup>	误差率/%	真实值/万元	仿真值/万元	误差率/%
2006	9565.2	9585.4	0.21	65500	72030.3	9.97
2009	8393.6	8446.5	0.63	92974	99707.9	7.24
2012	9916.3	9840.4	-0.77	150570	160405.4	6.53
2016	8740.0	9019.6	3.20	159141	174535.2	9.67
年份	畜牧业用水量			畜牧业总产值		
	真实值/万 m <sup>3</sup>	仿真值/万 m <sup>3</sup>	误差率/%	真实值/万元	仿真值/万元	误差率/%
2006	308.6	325.2	5.38	68126	71566.6	5.05
2009	246.8	245.2	-0.65	120 993	120 213.9	-0.64
2012	394.4	384.8	-2.44	264 547	258 086.8	-2.44
2016	320	313.7	-1.96	244 461	240 106.2	-1.78

本文旨在通过优化种植业、畜牧业水资源配置来缓解地区水资源供需矛盾与水质污染。通过排除政策调控范畴外与对目标影响较小的参数,最终确定模型的敏感参数为粮食、油料、蔬菜、水果作物的单位用水量及种植面积占比,大牲畜、小牲畜的单位用水量及养殖数量占比。

### 3 MOP 模型的构建

将上述分析得到的敏感参数作为决策变量,以洋河 COD 浓度达标及供水能力为约束,农业水资源供需差额最小、农业总产值最大为目标,建立农业水资源 MOP 模型。

目标函数:

1)农业总产值最大化目标:

$$\text{Max}f_1 = \sum_{i=1}^4 P_i x_i y_i S + \sum_{i=1}^2 C_i a_i b_i L$$

(1)

2)农业水资源供需差额最小化目标:

$$\text{Min}f_2 = W - \left( \sum_{i=1}^4 x_i y_i S + \sum_{i=1}^2 a_i b_i L \right)$$

(2)

约束条件:

1)等式约束

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^4 y_i = 1; \\ \sum_{i=1}^2 b_i = 1 \end{cases}$$

(3)

2)非线性约束

洋河 COD 浓度约束:

$$\left( \sum_{i=1}^4 x_i y_i \alpha_i S \gamma_1 + \sum_{i=1}^2 a_i b_i \beta_i L \gamma_2 + \sum_{k=1}^2 R_k \right) / W_5 < 20$$

(4)

供水能力约束:

$$f_2 \geqslant 0$$

(5)

3)上下限约束

分析决策变量的历史值,结合实际进行估计得到其取值范围(表 2)。

表 2 决策变量取值范围

决策变量	初始值	取值范围
$x_1$	0.4133	[0.34,0.50]
$x_2$	0.7440	[0.60,0.88]
$x_3$	0.4960	[0.40,0.60]
$x_4$	0.4133	[0.34,0.49]
$y_5$	0.5800	[0.57,0.81]
$y_6$	0.0302	[0.03,0.04]
$y_7$	0.1239	[0.1,0.13]
$y_8$	0.2659	[0.2,0.29]
$a_1$	1.6578	[1.29,2.24]
$a_2$	6.6311	[5.16,8.94]
$b_1$	0.1232	[0.12,0.14]
$b_2$	0.8768	[0.86,0.88]

式(1)到式(5)中: $P_i$ 表示第*i*种作物的单位用水效

益(元/ $\text{m}^3$ ); $C_i$ 表示第*i*种牲畜的单位用水效益(元/ $\text{m}^3$ ); $x_i$ 为第*i*种作物单位用水量(万  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ); $y_i$ 为第*i*种作物种植面积占比; $a_i$ 为第*i*种牲畜单位用水量( $\text{m}^3/\text{头}$ ); $b_i$ 为第*i*种牲畜养殖数量占比; $S$ 为总种植面积(万  $\text{hm}^2$ ); $L$ 为总牲畜数量(万头); $\gamma_1$ 为种植业 COD 入河系数、 $\gamma_2$ 为畜牧业 COD 入河系数; $\alpha_i$ 分别为第*i*种作物 COD 排放系数( $\text{t}/\text{万 m}^3$ )、 $\beta_i$ 第*i*种牲畜 COD 排放系数( $\text{t}/\text{万 m}^3$ ); $R_1$ 、 $R_2$ 分别为工业与生活 COD 处理入河量、工业与生活 COD 直排入河量( $\text{t}$ ); $W_5$ 洋河水量(万  $\text{m}^3$ ); $W$ 表示农业可供水量(万  $\text{m}^3$ )。模型部分系数的取值见表 3,由历史数据计算取值得到。

表 3 MOP 模型系数取值

系数	数值	系数	数值
$P_1$	11.11	$\alpha_1$	0.0044
$P_2$	3.08	$\alpha_2$	0.0025
$P_3$	59.74	$\alpha_3$	0.0061
$P_4$	13.56	$\alpha_4$	0.0099
$C_1$	6075.47	$\beta_1$	68.04
$C_2$	577.38	$\beta_2$	1.89

### 4 结果与分析

#### 4.1 MOP 模型有效性验证

模型的目标农业水资源供需差额、农业总产值计量单位不同,其中农业总产值为效益型属性值,农业水资源供需差额为偏离型属性值,所以对各目标进行归一化处理<sup>[7]</sup>。使用线性加权法将多目标问题转化为单目标问题进行 MOP 模型的求解。构造总体评价函数:

$$F = \sum_i^2 \lambda_i f_i$$

(6)

式中: $f_1$ 、 $f_2$ 为归一化后的农业总产值、农业水资源供需差额; $\lambda_1$ 为农业总产值权重, $\lambda_2$ 为农业水资源供需差额权重。

以 2016 年数据为例进行 MOP 模型有效性验证,在 Matlab 软件中利用非线性规划算法工具箱求解 MOP 模型,得到最优解集(即 SD 模型最优敏感参数)。表 4 为 MOP 优化前后敏感参数及目标值对比。

表 4 中,2016 年优化前后粮食作物种植占比增加 10.47%,蔬菜作物单位用水量增加 20.55%;大、小牲畜的单位用水量分别减少 22.24%、17.06%,根据表 4 中各作物及牲畜的用水效益及用水排污系数,各决策变量朝着高效益低排污方向调整。通过 MOP 优化后 2016 年的农业水资源供需差额降低了 273.38 万  $\text{m}^3$ ,水供需矛盾得到缓解,洋河 COD 浓

度降到 20 mg/L 达到水质标准,农业总产值降低了 6.63%,经济效益略有牺牲。

表 4 MOP 优化下 2016 年敏感参数及目标值对比

敏感参数	实际值	MOP 优化值
粮食作物单位用水量/ (万 m <sup>3</sup> · hm <sup>-2</sup> )	0.4133	0.3970
油料作物单位用水量/ (万 m <sup>3</sup> · hm <sup>-2</sup> )	0.7440	0.7584
蔬菜作物单位用水量/ (万 m <sup>3</sup> · hm <sup>-2</sup> )	0.4960	0.5979
水果单位用水量/(万 m <sup>3</sup> · hm <sup>-2</sup> )	0.4133	0.4112
粮食种植面积占比	0.5800	0.6407
油料种植面积占比	0.0302	0.0260
蔬菜种植面积占比	0.1239	0.1332
水果种植面积占比	0.2659	0.2001
大牲畜单位用水量/(m <sup>3</sup> · 头 <sup>-1</sup> )	1.6578	1.2891
小牲畜单位用水量/(m <sup>3</sup> · 头 <sup>-1</sup> )	6.6311	5.4999
大牲畜养殖数量占比	0.1232	0.1223
小牲畜养殖数量占比	0.8768	0.8777
农业总产值/万元	414641	387171
洋河 COD 浓度/(mg · L <sup>-1</sup> )	20.4216	20.0000
水资源供需差额/(万 m <sup>3</sup> )	-273.384	0.0009

4.2 目标年水资源优化配置

在 Vensim 软件中运行原 SD 模型,得到 2020 年的 SD 模型各项参数取值后,运用 MOP 模型求得 2020 年的最优敏感参数,进而得到 2020 年的最优农业水资源配置方案。2020 年宣化区的农业水资源配置优化前后对比见图 2。各目标量的变化见表 5。

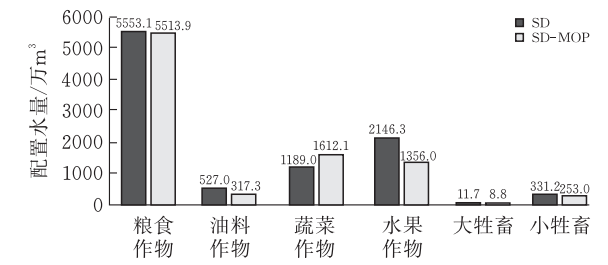


图 2 2020 年宣化区农业水资源配置优化前后对比

表 5 2020 年各目标变化

目标	单位	SD	SD-MOP
水资源供需差额	万 m <sup>3</sup>	-698.22	-1.04
洋河 COD 浓度	mg/L	20.55	19.99
农业总产值	万元	693736	610574

从图 2 可以看到,对比两种方案,2020 年 SD-MOP 方案中油料作物、大牲畜配水量分别减少了 39.79%、24.87%,蔬菜配水量增加 35.58%。从表 5

可看到,优化后 2020 年农业水资源供需差额降低了 697.18 万 m<sup>3</sup>,洋河 COD 浓度降低了 2.75%,农业总产值与 2019 年相比仍保持 10.77%的增长率。通过 SD-MOP 水资源优化配置,宣化区水资源供需矛盾得到有效缓解,水质污染得到有效控制。

5 结论

针对农业水资源系统,分析系统要素及其反馈关系,以宣化区为研究对象,建立 SD 模型进行地区农业水资源系统变化仿真及趋势预测,并建立了多目标规划模型,求解得出农业水资源优化配置方案,优化方案在满足水质达标及水量约束的前提下,合理的降低高排污低效益的油料、牲畜的水资源供给量,加大蔬菜等经济作物的水资源供给,实现水资源与农业经济协调发展。同时将仿真模拟技术与多目标优化方法相结合,发挥优化搜索能力的同时,发挥仿真模型的可靠性与模拟性优势,使决策方案更具可行性。为后续农业水资源优化配置研究提供参考借鉴。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 宋时帆,汤志龙,宋胜普.张家口市宣化区杂交谷绿色高产高效创建工作经验及发展对策[J].现代农业科技,2019(3):30-31.

[2] 王雅洁,刘俊国,赵丹丹.基于水足迹理论的水资源评价——以河北省张家口市宣化区为例[J].水土保持通报,2018,38(5):213-219.

[3] 张珊,谭倩,蔡宴朋,等.基于模糊优选和可信性的农业水资源多目标优化配置模型[J].南水北调与水利科技,2018,16(3):79-85.

[4] 王学全.青海湖流域水资源系统动力学模型构建及其应用[J].东北林业大学学报,2012,40(1):93-96.

[5] 李颜娟,田紫鸾.基于系统动力学的工程项目目标系统控制[J].湖北工业大学学报,2018,33(6):113-117.

[6] 姜秋香,董鹤,付强,等.基于 SD 模型的城市水资源承载力动态仿真——以佳木斯市为例[J].南水北调与水利科技,2015,13(5):827-831.

[7] 慈铁军,刘晓瑜.基于决策者偏好的区间数多属性决策属性值规范化方法[J].统计与决策,2015(3):36-38.

(下转第 37 页)