

# 纳入再生水利用的区域水资源优化配置研究

何琦<sup>1</sup>, 杨侃<sup>1</sup>, 陈静<sup>2</sup>, 华俊洪<sup>3</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 2. 宜兴水利局, 江苏宜兴 214207;  
3. 无锡市惠山区钱桥街道水利农机服务站, 江苏无锡 214100)

**摘要:** 将再生水纳入供水体系是缓解水资源短缺问题的战略性举措, 针对纳入再生水的多水源优化配置中存在的不确定性和稳定性问题, 耦合蒙特卡罗模拟和区间两阶段鲁棒随机优化, 构建多重不确定性条件下的多水源优化配置模型, 有效处理供水和需水过程中以区间和概率分布形式表征的不确定性, 同时权衡水资源配置中的可变随机值和追索成本, 控制系统风险, 得到不同情景下的水资源配置方案, 将改进的模型应用到山西大水网的临汾盆地—晋城沁丹河流域供水区, 综合分析不同情景下的区域用水效益和缺水损失, 得到不同再生水利用率下的多水源联合配置方案, 为决策者在不确定条件下考虑再生水利用的水资源优化配置方案提供了参考依据。

**关键词:** 水资源配置; 再生水; 不确定性; 蒙特卡罗模拟; 区间两阶段鲁棒随机规划

**中图分类号:** TV213.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-7709(2023)05-0048-04

## 1 引言

山西省是我国严重缺水地区之一, 水资源短缺形式严峻, 成为制约社会和经济发展的的重要因素, 在水资源优化配置供水水源中纳入再生水, 提高可供水量是解决区域缺水问题的关键<sup>[1]</sup>。而水资源优化配置系统是开放性的复杂大系统<sup>[2]</sup>, 涉及自然、社会相关的各类不确定性因素, 在不确定情况下平衡供水效益和缺水风险是水资源配置中需考虑的问题<sup>[3]</sup>。目前, 关于再生水纳入水资源配置系统存在的不确定性和对缓解供水压力、提升经济效益的相关定量研究有待完善。因此, 本文以山西大水网第七横临汾盆地—晋城沁丹河流域供水区为例, 考虑水资源系统的复杂不确定性, 并量化再生水纳入水资源优化配置领域产生的用水效益, 建立耦合蒙特卡罗模拟的区间两阶段鲁棒随机规划模型, 模拟区域不同情景下纳入再生水的供水方案, 以为研究区水资源配置提供参考。

## 2 模型构建与求解

### 2.1 模型构建

假设研究区域分为  $I$  个子区域, 供水系统有  $K$  种可供水源,  $K=1, 2, 3, 4$  分别代表地表水、地下水、外调水和再生水。需水系统包含  $J$  个需水部门,  $j=1, 2, 3, 4, 5$  分别代表生活、第一、二、三产业和生态环境用水。流域多水源、多用户之间的供、需水关系见图 1。

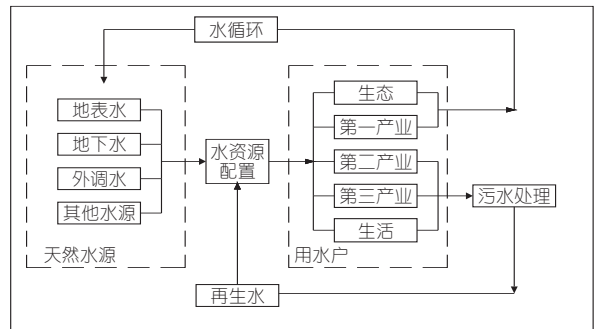


图 1 多水源多用户供水结构

Fig. 1 The structure of multiple water sources for multi-users system

收稿日期: 2022-05-31, 修回日期: 2022-08-02

基金项目: 山西省水利科学技术研究与推广资助项目(2017DSW02); 国家自然科学基金项目(52109034); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2452021085)

作者简介: 何琦(1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水资源规划与管理, E-mail: heqi\_hhu@163.com

通讯作者: 杨侃(1965-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为水资源规划与管理, E-mail: kyang@hhu.edu.cn

在保证区域水资源承载力的前提下,利用蒙特卡罗模拟产生多水源条件下不同再生水回用率时的再生水资源量概率分布区间,设置第一阶段目标为流域供水效益最大化,第二阶段目标为缺水产生的经济损失最小化,建立供水区耦合蒙特卡罗模拟的区域两阶段鲁棒随机规划模型。

### 2.1.1 目标函数

考虑到在实际水资源配置过程中,规划年来水水平、再生水利用率水平、用水效益系数和缺水惩罚参数等变量模糊不确定,采用区间数的形式表达参数不确定性,其中“+”为上限值,“-”为下限值,则有:

$$\max f^{\pm} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^5 B_{ij}^{\pm} W_{ij}^{\pm} - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^5 \sum_{h=1}^3 P_h C_{ij}^{\pm} S_{ijh}^{\pm} - \rho \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^5 \sum_{h=1}^3 P_h \left| C_{ij}^{\pm} S_{ijh}^{\pm} - P_h \sum_{h=1}^3 C_{ij}^{\pm} S_{ijh}^{\pm} \right| \quad (1)$$

式中,  $f^{\pm}$  为综合用水效益;  $B_{ij}^{\pm}$  为  $i$  区域用水户  $j$  的用水效益系数,元/ $m^3$ ;  $W_{ij}^{\pm}$  为  $i$  区域用水户  $j$  的预先供水目标;  $P_h$  为不同来水频率对应的概率,并设置丰水年、平水年、枯水年三种典型来水情况,  $h=1, 2, 3$  分别代表丰、平、枯水年,则有  $0 < P_h < 1, \sum_{h=1}^3 P_h = 1$ ;  $C_{ij}^{\pm}$  为  $i$  区域用水户  $j$  的目标供水量未达到时的缺水惩罚参数,元/ $m^3$ ;  $S_{ijh}^{\pm}$  为来水水平为  $h$  时  $i$  区域用水户  $j$  在目标供水量未达到时的缺水量;  $\rho$  为鲁棒系数。

式(1)中  $\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^5 \sum_{h=1}^3 P_h C_{ij}^{\pm} S_{ijh}^{\pm}$  为第二阶段的缺水经济损失的期望值,由于经济损失具有可变性,  $\left| C_{ij}^{\pm} S_{ijh}^{\pm} - P_h \sum_{h=1}^3 C_{ij}^{\pm} S_{ijh}^{\pm} \right|$  表示不同情景下第二阶段的约束经济损失,用  $\rho$  反映决策者对系统经济性和稳健性的态度,为在求解过程中保证目标函数线性化,引入目标线性规划,采用松弛变量  $\theta_{ih}$  保证模型的稳定性和非负性,改进后的目标函数<sup>[4]</sup>为:

$$\max f^{\pm} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^5 B_{ij}^{\pm} W_{ij}^{\pm} - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^5 \sum_{h=1}^3 P_h C_{ij}^{\pm} S_{ijh}^{\pm} - \rho \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^5 \sum_{h=1}^3 P_h (C_{ij}^{\pm} S_{ijh}^{\pm} - P_h \sum_{h=1}^3 C_{ij}^{\pm} S_{ijh}^{\pm} + \theta_{ih}^{\pm}) \right] \quad (2)$$

### 2.1.2 约束条件

(1)供水能力约束。表达式为:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^4 (W_{ij}^{\pm} - S_{ij}^{\pm}) \leq \sum_{k=1}^4 X_{kh}^{\pm} \quad (3)$$

式中,  $X_h^{\pm}$  为典型年  $h$  时可供水总量,  $10^8 m^3$ 。

(2)最小需水量约束。表达式为:

$$W_{ij}^{\pm} - S_{ij}^{\pm} \geq \alpha_{ij} W_{ij}^{\pm} \quad (4)$$

(3)追索变量约束。表达式为:

$$C_{ij}^{\pm} S_{ijh}^{\pm} - P_h \sum_{h=1}^3 C_{ij}^{\pm} S_{ijh}^{\pm} + \theta_{ih}^{\pm} \geq 0 \quad (5)$$

(4)非负约束。表达式为:

$$W_{ij}^{\pm} \geq S_{ij}^{\pm} \geq 0 \quad (6)$$

## 2.2 模型求解

考虑到不同来水频率下的区域污水排放量的复杂不确定,对应的不同再生水利用率下的再生水回用量无法准确界定,采用蒙特卡罗模拟的方式随机模拟其概率分布<sup>[5,6]</sup>,模拟公式为:

$$X_{4h} = \sum_{i=1}^4 \beta \chi (W_{i1} + W_{i3} + W_{i4}) \quad (7)$$

式中,  $X_{4h}$  为再生水可供水量,  $10^4 m^3$ ;  $\beta$  为污水排放率;  $\chi$  为再生水利用率,  $W_{i1}, W_{i3}, W_{i4}$  分别为  $i$  区域生活、第二产业、第三产业需水量,其中污水排放率受来水水平影响较小,以模糊三角数的形式表征,并利用蒙特卡罗模拟法计算求解。

采用规划水平年污水排放量乘以再生水利用率的方法<sup>[7]</sup>,计算得到以区间形式表达的可供水量,采用交互式算法将耦合的 MCS-ITRSP 模型转化为两个确定的上下限子模型,具体流程见图 2。

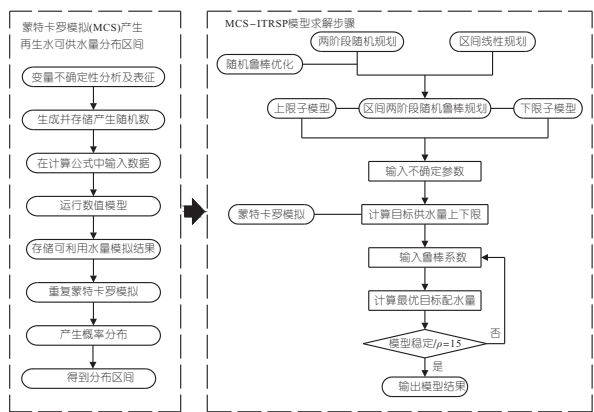


图 2 MCS-ITRSP 模型求解示意图

Fig. 2 MCS-ITRSP model solution diagram

将 MCS-ITRSP 按交互式算法分解为两个子模型求解,考虑到可供水量的不确定性,引入决策因子  $Z_{ij}$ ,取值在  $0 \sim 1$  之间,令  $W_{ij}^{\pm} = W_{ij}^{-} + Z_{ij} \Delta W_{ij}$ ,  $\Delta W_{ij}$  为可供水量的变化范围。

对应的下限子模型的目标函数为:

$$\max f^{-} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^5 B_{ij}^{-} (W_{ij}^{-} + \Delta W_{ij} Z) - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^3 \sum_{h=1}^3 P_h C_{ij}^{+} S_{ijh}^{+} - \rho \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^5 \sum_{h=1}^3 P_h (D_{ij}^{+} S_{ijh}^{+} - P_h \sum_{h=1}^3 D_{ij}^{+} S_{ijh}^{+} + \theta_{ih}^{+}) \quad (8)$$

约束条件为:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^5 (W_{ij}^- + \Delta W_{ij} Z_{ij} - S_{ijh}^+) \leq \sum_{k=1}^4 X_{kh}^- \\ (W_{ij}^- + \Delta W_{ij} Z_{ij}) - S_{ijh}^+ \geq \alpha_{ij} (W_{ij}^- + \Delta W_{ij} Z_{ij}) \\ D_{ij}^+ S_{ijh}^+ - P_h \sum_{h=1}^3 D_{ij}^+ S_{ijh}^+ + \theta_{ih}^+ \geq 0 \\ S_{ijh}^+ \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

下限量模型的决策变量为  $S_{ijh}^+$ 、 $Z_{ij}$ ，求解可得方案最优综合效益下限  $f_{opt}^-$ 、缺水量上限  $S_{ijh, opt}^+$ 、决策因子  $Z_{ij, opt}$ 。

同理得到上限量模型的目标函数为：

$$\begin{aligned} \max f^+ = & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^5 B_{ij}^+ (W_{ij}^- + \Delta W_{ij} Z_{ij}) - \\ & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^5 \sum_{h=1}^3 P_h C_{ij}^- S_{ijh}^- - \rho \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^5 \sum_{h=1}^3 P_h (D_{ij}^- S_{ijh}^- - \\ & P_h \sum_{h=1}^3 D_{ij}^- S_{ijh}^- + \theta_{ih}^-) \end{aligned} \quad (10)$$

约束条件为：

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^5 (W_{ij}^- + \Delta W_{ij} Z_{ij} - S_{ijh}^-) \leq \sum_{k=1}^4 X_{kh}^+ \\ (W_{ij}^- + \Delta W_{ij} Z_{ij}) - S_{ijh}^- \geq \alpha_{ij} (W_{ij}^- + \Delta W_{ij} Z_{ij}) \\ D_{ij}^- S_{ijh}^- - P_h \sum_{h=1}^3 D_{ij}^- S_{ijh}^- + \theta_{ih}^- \geq 0 \\ S_{ijh}^- \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

上限量模型的决策变量为  $S_{ijh}^-$ ，求解可得方案最优用水效益上限  $f_{opt}^+$ 、缺水量下限  $S_{ijh, opt}^-$ 。

最终求解的模型的配水缺水范围为  $[S^-, S^+]$ ，总收益范围为  $[f^-, f^+]$ 。

### 3 纳入再生水利用的区域水资源优化配置研究

#### 3.1 概况

表 1 2025 年不同情景下可供水量预测

Tab. 1 The forecast of water supply under different scenarios in 2025

$10^8 \text{ m}^3$

来水	地表水	地下水	外调水	再生水			总量	
				25%	50%	0%	25%	50%
25%	[3.58, 3.96]	[2.21, 2.45]	[1.34, 1.46]	[0.67, 0.93]	[1.34, 1.87]	[7.13, 7.87]	[7.80, 8.80]	[8.47, 9.74]
50%	[3.05, 3.37]	[2.21, 2.45]	[1.34, 1.46]	[0.67, 0.93]	[1.34, 1.87]	[6.60, 7.28]	[7.27, 8.21]	[7.94, 9.15]
75%	[2.60, 2.87]	[2.21, 2.45]	[1.34, 1.46]	[0.67, 0.93]	[1.34, 1.87]	[6.15, 6.78]	[6.82, 7.71]	[7.49, 8.65]

表 2 临汾盆地—晋城沁丹河流域 2025 年各类用水户供水目标

Tab. 2 Water supply targets for each water user in Linfen Basin-Jincheng Qindan River watershed for 2025

$10^4 \text{ m}^3$

区域	生活	第一产业	第二产业	第三产业	生态	总量
1	[4 840, 5 350]	[12 670, 14 004]	[2 207, 2 439]	[2 106, 2 328]	[1 021, 1 129]	[22 844, 25 250]
2	[2 591, 2 863]	[8 023, 8 868]	[2 371, 2 620]	[607, 671]	[606, 670]	[14 197, 15 691]
3	[3 192, 3 528]	[5 675, 6 273]	[3 770, 4 168]	[47, 53]	[518, 572]	[13 203, 14 593]
4	[4 959, 5 480]	[7 039, 7 781]	[6 410, 7 086]	[1384, 1 530]	[700, 772]	[20 492, 22 648]

在“山西大水网”建设背景下，选取大水网第七横临汾盆地—晋城沁丹河流域为研究区域，该区域通过引沁入汾工程与张峰水库供水工程联通沁河、汾河与丹河，水库供水工程包括张峰水库、东焦河水电站、任庄水库等已建成的水利设施，以满足流域用水需求。区域供水网络概化图见图 3。

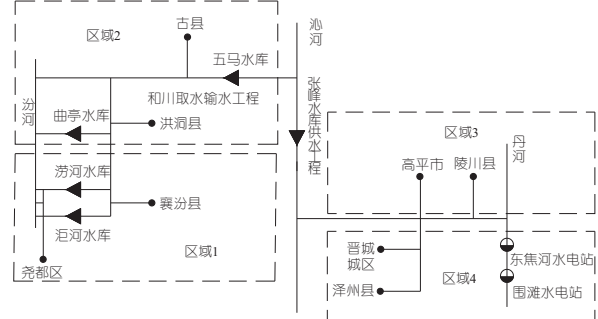


图 3 临汾盆地—晋城沁丹河流域供水系统分区网络概化图  
Fig. 3 Schematic diagram of water supply system network in the Linfen Basin-Jincheng Qindan River watershed

考虑到不同典型年份不同来水概率下的可供水量不同，根据《山西省统计年鉴》和《山西省水资源公报》及临汾市和晋城市供水资料等相关资料，分析区域内的多个供水源，并利用蒙特卡罗模拟产生 2025 年不同再生水利用率下的再生水供水量区间，结果见表 1。

结合《临汾市国民经济和社会发展统计公报》、《晋城市国民经济和社会发展统计公报》等统计资料中的用水量数据，临汾盆地—晋城沁丹河流域供水区内各类用水户 2025 年供水目标的上下限预测值见表 2。

目标函数中的用水效益系数和缺水惩罚参数参考分摊系数法和山西省水价数据，并以区间数形式表征其不确定性，结果见表 3。

#### 3.2 结果与分析

当不考虑系统风险(即鲁棒系数  $\rho=0$ )时，在确定规划年来水水平情况下，分别计算模型用水

表 3 2025 年各用户水资源配置用水效益系数和缺水惩罚参数

Tab. 3 Water efficiency coefficient and water shortage penalty parameter cost in water resource allocation of each user in 2025

系数类型	生活	第一产业	第二产业	第三产业	生态
用水效益	[9.38, 9.94]	[4.90, 5.28]	[7.62, 8.17]	[8.01, 8.52]	[8.40, 8.96]
缺水惩罚	[11.40, 12.75]	[6.75, 8.25]	[8.96, 10.09]	[9.87, 11.51]	[10.95, 12.45]

效益得到的结果见图 4,随着再生水利用率提升,水资源系统供水资源总量区间提升,配置系统效益均有不同程度提升,来水越少,再生水在水资源配置中发挥的作用越大,可有效提升水资源方案效益下限值,同时降低效益波动范围,其中不同再生水利用率水平对第一产业的供水情况影响较大。

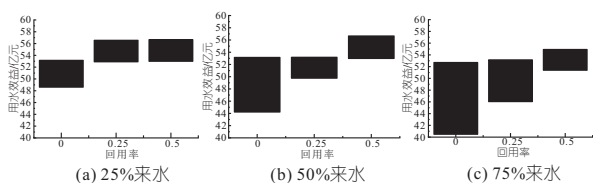


图 4 不同情景下的水资源配置方案效益区间  
Fig. 4 Benefit interval of water resource allocation schemes under different levels

当决策者开始更多考虑模型系统风险,不断增加鲁棒系数时,模型稳定性增强,系统总的用水效益下降,当鲁棒系数增加到一定程度时,系统经济效益不再降低,系统达到稳定状态。结合区域多年降水量、实际供用水情况等,设置规划水平年 2025 年丰、平、枯水年来水概率分别为 20%、60%、20%,根据模型计算的不同鲁棒系数下的模型计算结果见图 5。配置结果显示,再生水利用率  $x$  分别为 0%、25%、50%条件下,不考虑系统风险(即鲁棒系数  $\rho=0$ )时,临汾盆地—晋城沁丹河流域 2025 年水资源总的配置区间分别为  $[6.15 \times 10^8, 7.87 \times 10^8]$ 、 $[6.82 \times 10^8, 8.80 \times 10^8]$ 、 $[7.49 \times 10^8, 9.74 \times 10^8]$   $m^3$ ,总的效益区间分别为  $[44.34, 50.87]$ 、 $[49.22, 54.80]$ 、 $[52.45, 56.66]$  亿元,在再生水利用率 0%情况下,  $\rho \leq 15$  时无法使下性子模型达到稳定状态,当  $\rho=15$  时,系统效益区间为  $[18.86, 46.90]$ ,再生水利用率为

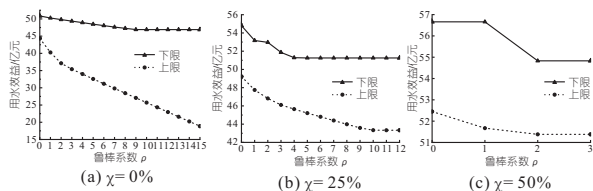


图 5 最优系统总用水效益与鲁棒系数的关系

Fig. 5 The relationship between the optimal total water use efficiency and the robustness coefficient

25%情况下,当  $\rho=11$  时模型达到稳定,此时效益区间为  $[43.33, 51.26]$ ,再生水利用率为 50%情况下,当  $\rho=2$  时模型达到稳定,此时效益区间为  $[51.38, 54.83]$ 。其中以再生水回用率  $x=25\%$  为例的供水区 2025 年水资源优化配置结果见表 4。模型配置结果表明提高再生水回用率对解决缺水地区供水问题,提升区域经济效益具有重要意义,为决策者在不确定条件下制定合理的水资源优化配置方案提供了参考。

表 4 2025 年水资源优化配置方案结果 ( $x=25\%$ )

Tab. 4 Results of optimal allocation of water resources in 2025 ( $x=25\%$ )

$\rho$	来水	区 域	$10^4 m^3$				
			生活	第一产业	第二产业	第三产业	生态
0	25%	1	5 350	12 670	2 439	2 328	1 129
		2	2 863	8 023	2 620	671	670
		3	3 528	5 675	4 168	53	572
		4	5 480	5 480	7 039	7 086	1 530
50%	25%	1	5 350	[10 704, 12 670]	2 439	2 328	1 129
		2	2 863	8 023	2 620	671	670
		3	3 528	5 675	4 168	53	572
		4	5 480	7 039	7 086	1 530	772
75%	25%	1	5 350	[11 359, 12 670]	2 439	2 328	1 129
		2	2 863	[5 456, 8 023]	2 620	671	670
		3	3 528	[3 859, 5 675]	4 168	53	572
		4	5 480	[6 267, 7 039]	7 086	1 530	772
11	25%	1	4 840	[11 319, 12 670]	2 207	2 106	1 021
		2	2 591	[7 167, 8 023]	2 371	607	606
		3	3 192	5 675	3 770	47	518
		4	4 959	7 039	6 410	1 384	700
50%	25%	1	4 840	[8 616, 12 670]	2 207	2 106	1 021
		2	2 591	[5 456, 8 023]	2 371	607	606
		3	3 192	[4 689, 5 675]	3 770	47	518
		4	4 959	7 039	6 410	1 384	700
75%	25%	1	4 840	[11 319, 12 670]	2 207	2 106	1 021
		2	2 591	[7 167, 8 023]	2 371	607	606
		3	3 192	[5 346, 5 675]	3 770	47	518
		4	4 959	7 039	6 410	1 384	700

## 4 结论

a. 建立 MCS-ITRSP 模型求解临汾盆地—晋城沁丹河流域不确定条件下多水源优化配置,得到不同再生水利用率时,不同系统风险下综合效益最大化的配置方案,为解决流域水资源配置中的不确定性问题提供了决策依据。

b. 随着再生水利用率的不断提升,可供水资源总量区间增加,系统总经济效益增加,模型稳定性收敛速度加快,可有效缓解流域供水压力,对流域缺水问题具有参考意义。

c. 本文主要针对水量配置,未来可将水质因素亦加入配置中考虑。

### 参考文献:

[1] 陈莹,耿华,刘静,等.再生水利用规划与管理存在的问题及思考[J].中国水利,2021(15):52-54.

域评估工作提供了重要技术依据。

#### 参考文献:

- [1] 潘志祥. 长沙洪涝分析及防灾减灾对策思考[J]. 湖南水利水电, 2000(3): 34-36.  
 [2] 宋源, 周杨军, 毛斌. 2017 年长沙特大洪涝灾害分析[J]. 防灾科技学院学报, 2018, 20(2): 71-77.  
 [3] 潘志祥, 黎组贤, 叶成志. 湖南省天气预报手册

[M]. 北京: 气象出版社, 2015: 131-133.

- [4] DAVIDSON R A, LAMBERT K B. Comparing the hurricane disaster risk of U. S. coastal countries [J]. Natural hazards review, 2001, 2(3): 101-156.  
 [5] 王小笑, 刘业伟, 付佳伟. 江西省山洪灾害风险评估区划[J]. 水电能源科学, 2021, 39(10): 85-88.  
 [6] 李魁明, 帅红. 基于 GIS 的长沙市洪涝灾害风险动态评估[J]. 防灾科技学院学报, 2014, 16(1): 48-56.

## Study on Risk Assessment of Rainstorm Disaster and Zoning in Changsha County

SU Tao<sup>1,2</sup>, ZHAO En-rong<sup>1</sup>, YAO Rong<sup>1</sup>, CHEN Jing-jing<sup>1</sup>, CHEN Hong-zhuan<sup>3</sup>, JIANG Wan-ting<sup>1</sup>

(1. Hunan Meteorological Bureau, Changsha 410118, China; 2. Hunan Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Changsha 410118, China; 3. Huaihua Meteorological Bureau, Huaihua 418099, China)

**Abstract:** By investigating the historical meteorological data, disaster situation data and disaster bearing body information during 1951-2020, this paper establishes a risk survey database to accurately evaluate the hazard of rainstorm disaster in Changsha County of Hunan Province. Comprehensively considering the impact of multiple meteorological disaster causing factors of rainstorm disaster and inducing environment such as geology and drainage network of watershed, this paper carries out the analysis of basic characteristics of rainstorm and risk assessment of disaster, and forms a risk assessment model. Geological disasters in Changsha County mainly occur in the northeast of Changsha County. The urban waterlogging disaster mainly affects the county seat and the surrounding areas with high urbanization. Mountain torrents mainly affect the central and northern areas of Changsha County. The risk of rainstorm disaster in Changsha County tends to weaken from the southeast and northeast to the middle. Generally speaking, the risk of rainstorm in the whole county is not high, only Kaihui Town, Gaoqiao Town and Huanghua town are high-risk, and rainstorm events are easy to cause secondary disasters in these three towns. There are two relatively high value centers in the county, which are located in Huanghua town and Jiangbei town in the southeast and Kaihui town and Gaoqiao Town in the north. The comprehensive risk level of rainstorm in Ansha Town, Guoyuan Town, Chunhua Town and urban area in the middle is low.

**Key words:** risk survey; rainstorm disaster; Changsha County; hazard assessment

(上接第 51 页)

- [2] 李建勋, 解建仓, 申静静, 等. 基于复杂性理论的水资源配置框架及方法体系[J]. 水电能源科学, 2017, 35(1): 21-24, 20.  
 [3] 单义明, 杨侃, 吴云, 等. 基于 ITS RP 模型的吕梁市水资源优化配置研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(11): 42-47.  
 [4] YU C S, LI H L. A robust optimization model for stochastic logistic problems[J]. International journal

of production economics, 2000, 64(1-3): 385-397.

- [5] 刘静. 多重不确定性条件下流域水质管理与水资源配置[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.  
 [6] 陈文苑, 张明, 赵伟. 不确定条件下水资源系统多目标优化配置研究[J]. 水力发电学报, 2021, 40(12): 12-24.  
 [7] 张海君. 考虑供需不确定性的区域水质水量联合优化配置研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.

## Study on Watershed Water Resources Allocation with Reclaimed Water Utilization

HE Qi<sup>1</sup>, YANG Kan<sup>1</sup>, CHEN Jing<sup>2</sup>, HUA Jun-hong<sup>3</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Yixing Water Resources Bureau, Yixing 214207, China;

3. Wuxi Huishan Qianqiao Street Water Conservancy and Agricultural Machinery Service Station, Wuxi 214100, China)

**Abstract:** Integrating reclaimed water into water supply system is a strategic measure to alleviate the problem of water resource shortage. Aiming at the uncertainty and stability existing in the optimal allocation of multiple water sources including reclaimed water, Monte Carlo simulation and interval two-stage robust stochastic optimization were coupled to build the optimal allocation model of multiple water sources under the condition of multiple uncertainties. The uncertainty represented by the form of interval and probability distribution in the process of water supply and water demand was effectively handled. The variable random value of water resources allocation and the recourse cost were balanced, and the system's risk was controlled. The water resources allocation schemes were obtained under different scenarios. The improved model was applied to water supply area in Linfen Basin-Jincheng Qindan river watershed of Shanxi large water network. Based on the comprehensive analysis of regional water efficiency and water loss under different scenarios, the joint allocation scheme of multiple water sources under different utilization rates of reclaimed water was obtained, which provides a reference for decision makers to consider the optimal allocation scheme of reclaimed water under uncertain conditions.

**Key words:** water resources allocation; reclaimed water; uncertainty; Monte Carlo simulation; interval two-stage robust stochastic programming