

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221412

# 湖南省长沙县暴雨灾害危险性评估与区划研究

苏 涛<sup>1,2</sup>, 赵恩榕<sup>1</sup>, 姚 蓉<sup>1</sup>, 陈静静<sup>1</sup>, 陈红专<sup>3</sup>, 江婉婷<sup>1</sup>

(1. 湖南省气象台, 湖南长沙 410118; 2. 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 湖南长沙 410118;  
3. 怀化市气象台, 湖南怀化 418099)

**摘要:** 为准确评估湖南省长沙县暴雨灾害危险性,通过调查 1951~2020 年历史气象数据、灾情数据和最新的承灾体信息,建立风险普查数据库,综合考虑暴雨灾害多项气象致灾因子和地形、河网水系等孕灾环境的影响,开展暴雨基本特征分析和灾害危险性评估,形成危险性评估模型。结果表明,长沙县地质灾害主要出现在长沙县东北部区域;城市内涝灾害主要影响县城和周边城镇化较高地区;山洪灾害主要影响长沙县中部和北部地区。长沙县暴雨灾害危险性分布自东南、东北向中部呈减弱趋势,开慧镇、高桥镇、黄花镇为高风险,暴雨事件在这三个乡镇容易造成次生灾害;全县存在两个相对高值中心,分别位于东南部黄花镇、江背镇及北部开慧镇、高桥镇;中部的安沙镇、果园镇、春华镇和县城附近暴雨灾害危险性等级低。

**关键词:** 风险普查; 暴雨灾害; 长沙县; 危险性评估

**中图分类号:** TV122<sup>+</sup>.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)05-0001-05

## 1 概况

湖南省长沙县地处湘江东岸,域内河流众多,属于长江流域的洞庭湖水系,境内浏阳河、捞刀河等受上游强降雨及湘江河水顶托作用影响,常出现洪峰。长沙县东北高、西南低的地形有利于西南暖湿气流长驱直入,西北部的明月山、东北部龙华山、东南部的乌川山受地形抬升影响,为暴雨多发区,易导致山洪、地质灾害<sup>[1,2]</sup>。县城受热岛效应影响,多对流性强降雨发生,同时受下垫面排水能力限制,易产生城市内涝。作为全国暴雨内涝风险普查第一批试点县,本文以长沙县为例,查明主要灾害风险隐患,建立风险普查数据库,构建灾害危险性评估模型,综合考虑暴雨灾害多项气象致灾因子和地形、河网水系等孕灾环境的影响,开展暴雨基本特征分析和灾害危险性评估,全面提升综合防灾减灾能力,并将作为后续湖南省、全国全面开展区域评估工作的重要技术依据。

## 2 数据与方法

长沙县暴雨灾害综合风险普查主要用到三类基础数据:①气象数据,选取长沙县国家气象站 1951~2020 年逐小时降雨量数据及长沙县境内 49 个区域站 2010~2020 年逐小时降雨量数据;②暴雨灾情数据,为长沙县应急局、长沙县统计局提供的统计年鉴数据和长沙县气象局统计年鉴数据;③暴雨承灾体信息,包括人口、经济、农作物等相关信息。

暴雨灾害风险普查综合考虑了暴雨灾害多项气象致灾因子,开展暴雨基本特征分析和灾害危险性评估。统计分析收集的灾情和气象数据,挑选合适的致灾因子作为暴雨强度的评估指标,计算暴雨过程强度指数和暴雨灾害危险性。

## 3 历史暴雨灾情概况及暴雨时空变化特征

### 3.1 历史暴雨灾情概况

长沙县 2000~2020 年有记录的暴雨灾情共计 127 次,其中地质灾害 97 次,山洪灾害 10 次,中小河流洪水灾害 5 次,城市内涝 15 次,受灾人

**收稿日期:** 2022-07-11, **修回日期:** 2022-08-20

**基金项目:** 湖南省气象局业务能力建设项目(NLJS15);湖南省气象局重点课题(XQKJ22C008);湖南省重点领域研发计划项目(2019SK2161)

**作者简介:** 苏涛(1992-),男,工程师,研究方向为暴雨预报与技术方法,E-mail: sutao175819@163.com

**通讯作者:** 陈静静(1984-),女,高级工程师,研究方向为灾害性天气预报预警技术,E-mail: chenjj@nudt.edu.cn

口 775 944 人,死亡人口 3 人,总体直接经济损失 142 439.6 万元。地质灾害主要出现在金井镇、路口镇、高桥镇等长沙县东北部区域;城市内涝灾害主要影响黄兴镇、长龙街道、湘龙街道、星沙街道、黄花镇等县城和城镇化较高的地区;山洪灾害主要影响安沙镇、金井镇、果园镇等中部和北部地区(图 1)。

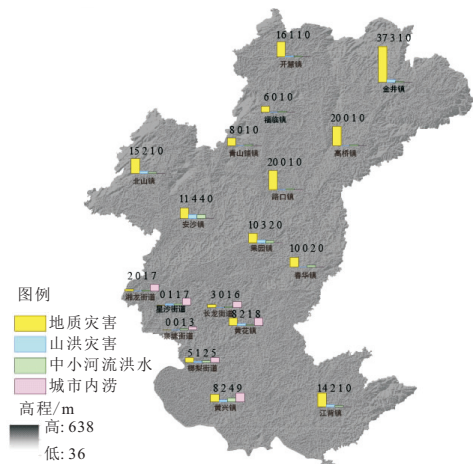


图 1 长沙县各乡镇 2000~2020 年暴雨衍生灾害分布  
Fig. 1 Spatial distribution of rainstorm derived disasters of Changsha County from 2000 to 2020

长沙县 1978~1999 年有记录灾情共计 62 次,其中地质灾害 48 次,山洪灾害 5 次,中小河流洪水灾害 9 次,城市内涝 0 次,受灾人口 393 254 人,死亡人口 96 人,总体直接经济损失 44 4349.1 万元。

### 3.2 暴雨时空变化特征

#### 3.2.1 暴雨时间变化特征

利用降水数据筛选出长沙县日降水大于 50 mm 的暴雨过程,从暴雨日数的年际变化(图 2)可以看出,整体呈小幅增加趋势,1950 年代以来,长沙县年暴雨日数整体增长了 1 d。长沙县每年暴雨日数在 4 d 左右,1969、1998、2005 年出现了三个峰值,每年均出现 9 个暴雨日。暴雨日数的季节变化(图 3)表现出明显的单峰结构,6 月最大,平均暴雨日超过 1 d,往两端逐渐减少。

#### 3.2.2 暴雨空间分布

利用长沙县国家气象站和长沙县区域自动站

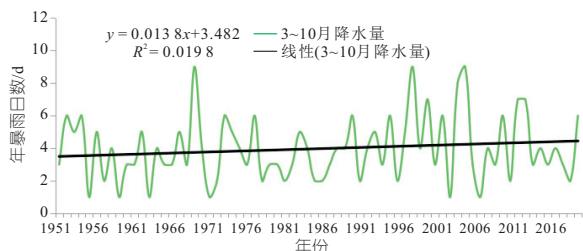


图 2 长沙县年暴雨日年际变化

Fig. 2 Interannual variation of annual Rainstorm Day in Changsha County

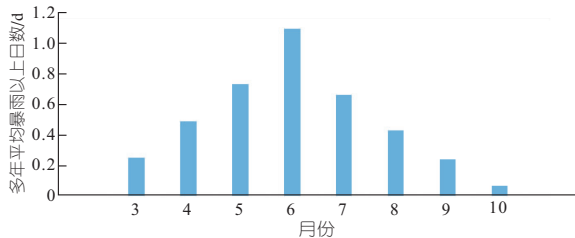


图 3 长沙县 3~10 月各月暴雨以上日数

Fig. 3 Rainstorm days in each month from March to October in Changsha County

多年平均 3~10 月降水量数据,采用插值法,得到长沙县 3~10 月降水量空间分布图(图 4),全县整体降水量在 1 000 mm 附近,南部(黄兴镇、江背镇)相对较多,降水量在 1 060~1 100 mm 之间,东北部(金井镇)和西部(北山镇)较少,降水量在 880~960 mm 之间。降水量的这种分布特征与长沙县地形和水体的分布有关,长沙县南侧地形更平坦,狭管效应对降水有一定增幅作用;水系主要集中在南侧,本地水汽供应和湿度条件更好,地形和水体分布共同造成南部降水量相对较大。

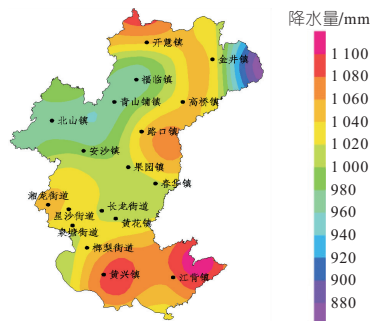


图 4 长沙县多年平均 3~10 月降水量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of annual average monthly precipitation in Changsha County

从长沙县暴雨日数空间分布图(图 5)可以看出,长沙县多年平均年暴雨日数分布差异较大,中部地区(路口镇、安沙镇)暴雨日数较多,每年暴雨日数接近 5 d,南部(江背镇、黄花镇、黄兴镇)整体暴雨日数相对较少,江背镇的年暴雨日基本在 3 d 以下。

## 4 致灾因子分析

### 4.1 致灾因子识别

长沙县地处长江中下游,是东亚季风影响的关键区,每年雨季较长,降水量较多,暴雨及其产生的次生灾害频发<sup>[3]</sup>。从 1980 年代以来有统计的暴雨灾害直接经济损失变化来看(图 6),1990 年代和 2016、2017 年因暴雨造成的直接经济损失较大,这与暴雨强度、落区、社会发展程度及防汛工程有关,其中以长沙县出现最强降雨过程的

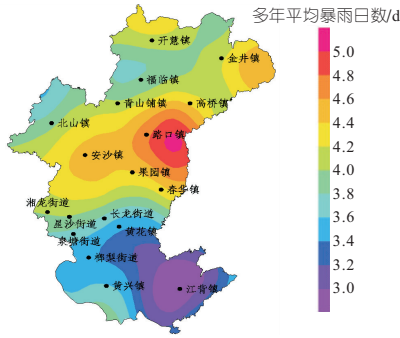


图 5 长沙县多年平均暴雨日数的空间分布  
Fig. 5 Spatial distribution of annual average rainstorm days in Changsha County

2017 年直接经济损失最大,达到了近 10 亿元。

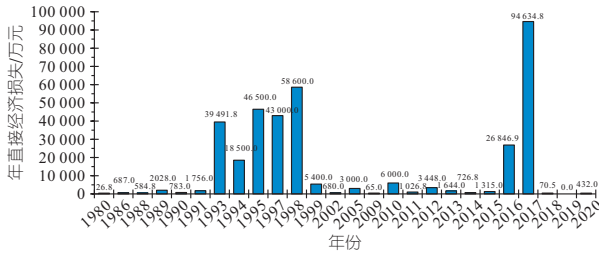


图 6 暴雨灾害直接经济损失年变化  
Fig. 6 Interannual change of direct economic loss of rainstorm disaster

利用暴雨灾情数据,进一步使用 Pearson 相关系数计算方法,分别计算不同承灾体(经济、人口、房屋等)灾损指数与暴雨过程各个气象因子的相关关系。从暴雨气象因子与灾损指数的相关系数表(表 1)可以看出,暴雨气象因子与直接经济损失的关系最为密切,两者的相关性较高,且有多个因子通过了显著性检验。因此将直接经济损失作为灾损评价指数,同时选取相关性最高的三个气象因子为暴雨致灾因子。最终确定暴雨持续时间、最大日雨量和过程累积雨量作为长沙县暴雨灾害的致灾因子。

表 1 暴雨气象因子与灾损指数相关系数表

Tab. 1 The correlation coefficients between rainstorm characteristic factors and disaster damage index

相关系数	持续 时间	过程累 积雨量	平均 雨量	$R_{1h}$	$R_{3h}$	$R_{6h}$	$R_{12h}$	最大日 雨量
直接经济损失	0.894*	0.838*	0.444	0.331	0.729*	0.736*	0.753*	0.838*
受灾人口	-0.05	0.378	0.452	0.01	0.258	0.285	0.263	0.378
受损房屋	0.301	-0.068	-0.247	-0.008	0.007	-0.034	-0.189	-0.068
农业受灾面积	0.258	-0.039	-0.264	-0.007	-0.039	0.03	-0.094	-0.039

注:标注\*的相关系数通过了 0.05 的显著性检验; $R_{1h}$ 、 $R_{3h}$ 、 $R_{6h}$ 、 $R_{12h}$  分别为 1、3、6、12 h 降雨量。

### 4.2 暴雨致灾因子特征

从长沙县暴雨过程三个暴雨致灾因子每月的分布情况(图 7)可以看出,暴雨持续时间、最大日雨量和过程累积雨量有明显季节变化,总体变化趋势基本一致,6~8 月暴雨致灾因子相对较强,

暴雨持续时间、最大日雨量和过程累积雨量在 8 月达到最大,分别为 26.8 h、91.8 mm、83.1 mm。同时三个致灾因子均存在两个峰值,分别为 6、8 月。暴雨持续时间大多集中在 1 d 左右,说明长沙县暴雨过程的降水时段相对集中,这也是各月最大日雨量和过程累积雨量相差较小的原因。

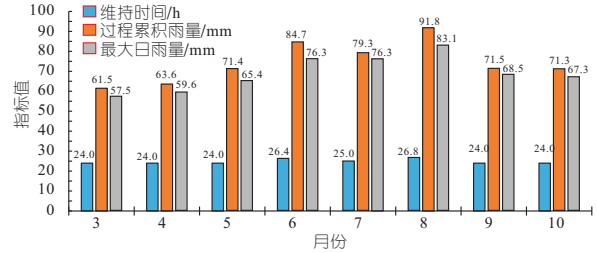


图 7 长沙县 3~10 月各月暴雨致灾因子分布情况  
Fig. 7 Distribution of disaster causing factors in Changsha County from March to October

## 5 暴雨灾害危险性评估

### 5.1 暴雨过程强度指数和年雨涝指数

根据暴雨持续时间、最大日雨量和过程累积雨量,归一化处理各评价指标,并采用相关系数法确定权重,加权求和得到暴雨过程强度指数  $I_{IR}$ ,其计算公式为:

$$I_{IR} = AI_{day} + BI_{24pre} + CI_{pre} \quad (1)$$

其中

$$A = r_A / (r_A + r_B + r_C); B = r_B / (r_A + r_B + r_C)$$

$$C = r_C / (r_A + r_B + r_C)$$

式中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  均为权重系数;  $I_{day}$ 、 $I_{24pre}$ 、 $I_{pre}$  分别为暴雨持续时间、最大日雨量、过程累积雨量归一化处理后的指标数值;  $r_A$ 、 $r_B$ 、 $r_C$  分别为暴雨持续时间、最大日雨量和过程累积雨量与灾损指数的相关系数。

最终得到暴雨致灾因子暴雨持续时间、最大日雨量、过程累积雨量的权重系数分别为 0.348、0.326、0.326。

统计长沙县各区域站暴雨持续时间、最大日雨量和过程累积雨量,并依次对其进行标准化处理,根据式(1)计算出每次暴雨过程的强度指数,将全年每次暴雨过程强度指数累加得到该年的年雨涝强度指数,多年平均后得到长沙县各站平均年雨涝指数。指数越大,表示暴雨过程越强、越极端,造成暴雨灾害的可能性越大。长沙县平均年雨涝指数(图 8)呈现自东南、东北向中部呈减弱趋势,东南部黄花镇及北部开慧镇、高桥镇平均年雨涝指数最高,为 0.6 以上,中部果园镇、春华镇平均年雨涝指数最低,在 0.2 以下。

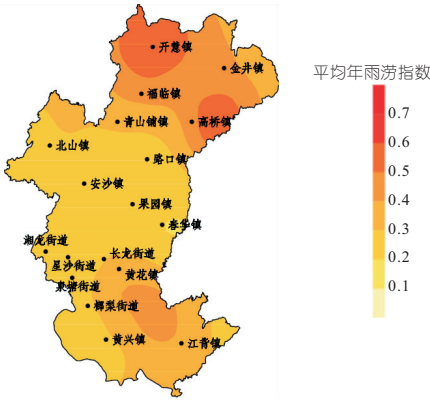


图 8 长沙县平均年雨涝指数分布

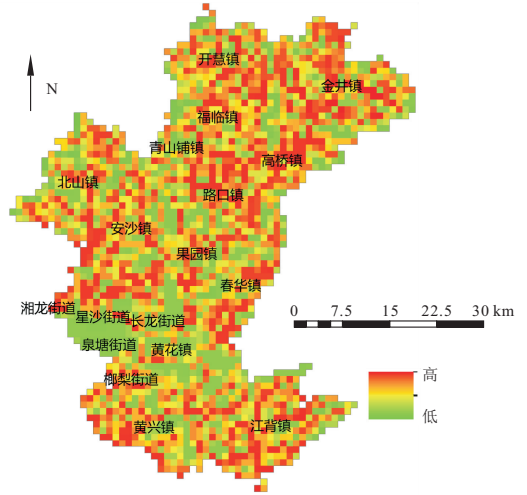


图 9 长沙县暴雨孕灾环境指数分布

Fig. 9 Comprehensive index distribution of disaster pregnant environment in Changsha County

表 2 暴雨灾害危险性等级划分

Tab. 2 Classification of rainstorm comprehensive risk

百分位范围 R	评估等级	百分位范围 R	评估等级
$R \leq 50\%$	低	$70\% < R \leq 90\%$	较高
$50\% < R \leq 70\%$	较低	$R > 90\%$	高

### 5.2 暴雨孕灾环境指数

暴雨灾害危险性除受暴雨事件影响,还与孕灾环境有关<sup>[4-6]</sup>。暴雨孕灾环境指暴雨影响下,对形成洪涝、地质灾害、城市内涝等次生灾害起作用的自然环境。暴雨孕灾环境对暴雨灾害危险性起扩大或缩小作用。暴雨孕灾环境可考虑地形、河网水系、地质灾害易发条件等,综合考虑孕灾环境影响,计算得到暴雨孕灾环境指数  $I_e$ ,其计算公式为:

$$I_e = w_h p_h + w_r p_r + w_d p_d \quad (2)$$

式中,  $w_h$ 、 $w_r$ 、 $w_d$  分别为地形因子、水系因子、地质灾害发条件对应的权重系数(权重系数的确定参考国家风险普查技术方案,采用专家打分法确定),分别为 0.3、0.4、0.3;  $p_h$ 、 $p_r$ 、 $p_d$  分别为地形因子影响系数、水系因子影响系数、地质灾害易发条件系数。

长沙县暴雨孕灾环境指数与山脉、河流水库的分布及地质条件有关,指数分布梯度较大,具有一定突变特点,总体来说中部偏南地区(星沙街道、泉塘街道、长龙街道、黄花镇)较低,其他地区较高,路口镇和高桥镇为孕灾环境指数高值中心,表示该区域的地理环境对暴雨致灾危险有较明显的增幅作用(图 9)。

### 5.3 暴雨灾害危险性等级

暴雨灾害危险性由孕灾环境和暴雨自身特征两部分决定,其计算式可表示为:

$$\text{暴雨灾害危险性指数} = (1 + \text{暴雨孕灾环境指数}) \times \text{平均年雨涝指数} \quad (3)$$

基于暴雨灾害危险性指数,参照表 2 对危险性进行空间单元划分,可得到暴雨灾害危险性等级(图 10)。由图 10 可知,长沙县暴雨灾害危险性等级自东南、东北向中部呈减弱趋势,开慧镇、高桥镇、黄花镇为高风险,暴雨事件在这三个乡镇

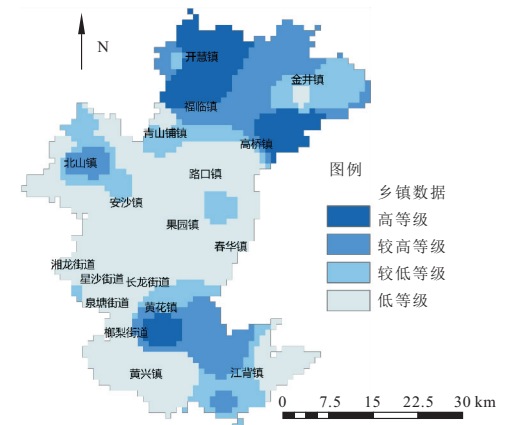


图 10 长沙县暴雨灾害危险性等级分布

Fig. 10 Distribution of comprehensive risk grade of Rainstorm in Changsha County

容易造成次生灾害,带来经济损失,需加强防范;全县存在两个相对高值中心,分别位于东南部黄花镇、江背镇及北部开慧镇、高桥镇;中部的安沙镇、果园镇、春华镇和县城附近暴雨灾害危险性等级低。

## 6 结论

本文建立了长沙县风险普查数据库,构建灾害危险性评估模型,相比于以往的暴雨风险研究,增加了更为翔实的灾情分析,并综合考虑了暴雨灾害多项气象致灾因子和地形、河网水系等孕灾环境的影响,以此开展暴雨灾害危险性评估,得出长沙县暴雨灾害危险性自东南、东北向中部呈减弱趋势。同时也为后续湖南省、全国全面开展区

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