

文章编号:0559-9350(2020)12-1502-12

供水系统可靠性-回弹性-脆弱性与多元要素的响应关系研究

徐博¹, 张弛¹, 蒋云钟², 黄强³, 王国庆⁴, 关铁生⁴

(1. 大连理工大学 建设工程学部 水利工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038;

3. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710077; 4. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 城市供水系统受来水、需水、水库调蓄等多种因素的交织耦合影响, 其评价指标体系亦涉及多个层面, 仅依靠供水保证率无法体现极端干旱事件在局部时段内所造成的不利影响。研究多种因素与评价指标之间的关联关系, 可用于快速、有针对性地识别出最有效的供水保障措施。本文以实验样本生成-样本模拟-样本数据挖掘为主线, 采用随机抽样生成大量供水系统实验分析样本, 基于SOP调度规则进行样本模拟, 利用多元弹性回归分析挖掘样本数据。以标准净入流 m 、库容系数 β 将实验样本分为4类, 研究了不同类型供水系统中年径流变差系数 C_v 、需水率 YI 、库容系数 β 与系统可靠性、回弹性、脆弱性3类评价指标之间的普适性关联关系, 定量比较了供水系统对多种影响因素变化的敏感程度。结果表明: (1)系统可靠性对3类影响因素变化的敏感程度呈现显著的边际效益递减规律, 面向不同区域的来水-需水-库容特征, 需要有针对性地选择不同的供水措施; (2)对于系统回弹性和脆弱性, 不论何种类型的供水系统均与年径流变差系数 C_v 的关联性最强, 需水率 YI 其次, 受库容系数 β 的影响程度最小, 为改善系统回弹性与脆弱性, 应从跨流域调水、备用应急水源建设、非常规水利用等方面进行系统设计; (3)水量较充沛且水库调蓄能力也较强的系统在一般枯水年往往不会缺水, 容易被忽视, 但在特枯或连续枯水年仍面临缺水风险。

关键词: 供水系统; 可靠性-回弹性-脆弱性; 多元弹性分析; 水库调度; 多要素分析**中图分类号:** TV213.9**文献标识码:** A**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20200853

1 研究背景

随着我国社会经济的高速发展, 超大规模城市的出现, 区域水资源供需矛盾日益突出, 需要采取节水管理、非常规水利用、水库建设、跨流域调水等供水保障措施来满足持续增长的水资源需求^[1-3]; 这些措施与流域的气象水文特征耦合在一起, 共同影响着供水系统的效率; 同时, 在气候变化影响下我国极端干旱事件趋多趋强^[4-5], 如辽宁省大连市, 21世纪以来已发生2次连续特殊枯水年(1999—2003年、2014—2018年)^[6]。极端干旱事件导致供水破坏的持续时间更长、破坏深度更大, 给区域的社会和经济发展带来挑战。因此, 仅以供水保证率作为系统评价标准, 无法体现极端干旱事件在局部时段内所造成的不利影响, 需要综合考虑缺水的频率、持续时间和缺水程度来建立评价指标体系^[7-8]。

供水系统受到多种因素的交织耦合影响, 需要多元评价指标。建立各种影响因素与多元评价指标之间的关联关系, 可帮助决策者理解如何最有效地提升供水表现, 并成为供水系统规划设计的重要依据。国内外学者的相关研究中, 大多以实例分析为主, 在不同的来水-需水-水库库容组合情景

收稿日期: 2020-10-18; 网络首发时间: 2020-12-01

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20201130.1608.001.html>

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(51925902); 国家自然科学基金青年项目(51709034)

作者简介: 徐博(1990-), 博士生, 主要从事水库调度研究。E-mail: bovey093@mail.dlut.edu.cn

通讯作者: 张弛(1975-), 教授, 博士生导师, 主要从事水资源系统分析、水文模拟、水环境工程学研究。

E-mail: czhang@dlut.edu.cn

下, 模拟系统的缺水情况, 进而确定所需的水库规模^[9-10]、外调水规模^[11], 预估可供水量^[12], 或评价气候变化^[13-14]、社会经济发展^[15]所带来的影响。然而, 这类研究往往聚焦于特定的案例, 难以概括归纳出供水系统中各类影响因素与评价指标之间相关关系的普适性规律, 对其他供水系统指导意义有限。此外, 这类研究对历史径流资料的要求较高, 在一些缺乏径流观测资料或径流序列长度很短的区域难以开展。

针对上述问题, 有些学者基于概率转移理论, 利用径流序列的均值、方差、偏态系数等统计参数, 对供水系统的来水-需水-库容-供水保证率之间的相关关系进行理论推导, 此类研究一般被称为Gould-Dincer方法^[16-18](下文简称G-D方法)。G-D方法具有较好的普适性, 可推广至不同区域, 用于快速确定供水系统所需的库容规模、可供水量等^[19-20]。然而, G-D方法中涉及许多假定和简化, 存在以下局限性: ①一般假定每年年初库容为零, 忽略了年际间的水量补偿, 仅适用于具有年调节性能的供水系统; ②系统的评价指标常以供水保证率(可靠性)为主, 难以计算其他的评价指标; ③推导过程基于两阶段的马尔科夫链模型, 对年际间径流量差异较大的供水系统不适用。除此之外, 上述两类研究均侧重于分析单一影响因素变化对供水系统所产生的影响, 缺乏对不同的影响因素进行对比。

综上所述, 本文旨在揭示供水系统中多种影响因素与多元评价指标之间普适性的关联关系, 并定量比较不同类型供水系统对多种影响因素变化的敏感程度, 挖掘其中的控制性因素, 进而在不同区域快速地、有针对性地识别出最有效的供水保障措施。

2 研究方法

本文以实验样本生成-样本模拟-样本数据挖掘为主线, 主要研究思路如图1所示。首先, 对供水系统进行概化, 分析影响供水系统表现的最主要因素, 并建立包含系统可靠性、回弹性、脆弱性的多元评价指标体系; 之后, 将系统主要影响因素作为表征系统特征的关键参数, 设计参数的范围与抽样方式, 通过随机抽样生成10 000个实验样本并模拟得到各评价指标值; 最后, 以系统的影响因素作为自变量, 以系统可靠性、回弹性、脆弱性作为因变量, 利用多元弹性回归分析方法(Multivariate Elasticity Analysis, MEA)建立多元评价指标与来水、需水、库容等影响因素之间的相关关系, 进而挖掘不同指标对不同影响因素变化的敏感程度。

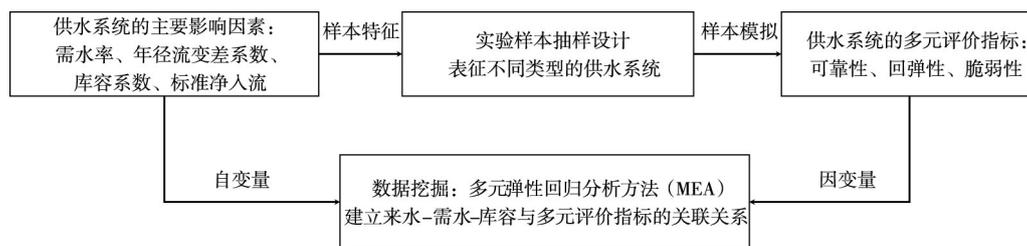


图1 主要研究思路

2.1 供水系统的主要影响因素 供水系统的表现主要受到来水、需水、水库调蓄三方面因素影响。来水不仅受流域的天然径流条件控制, 还受到跨流域调水、非常规水等人工水源的影响, 是供水系统的基本输入, 直接影响着供水满意度。需水与社会经济发展水平、工农业用水比例、节水水平等因素相关。水库等调蓄工程用来蓄峰补枯, 是衔接来水与需水的关键所在, 调蓄能力的大小也显著影响供水系统的表现。下面对以上三方面影响因素进行概化并介绍其计算原理。

(1)与来水条件相关的统计参数包括: 年均径流量 μ 、年径流均方差 σ 、变差系数 C_V 、偏态系数 C_S 、年径流自相关系数、径流的年内分布规律等。相关学者在研究供水系统时, 指出年均径流值 μ 和年径流变差系数 C_V 对供水系统的影响是最显著的, 其他统计参数的影响则显著低于 μ 和 C_V ^[16, 21]。为此, 本文研究主要考虑年均径流量 μ 、年径流变差系数 C_V 两个变量对供水系统的影响。

(2)需水条件的差异主要体现在总需水总量和需水过程, 本文主要面向城市生活、工业用水对象, 假定需水量在全年均匀分布。此外, 在不同的供水系统中, 需水量的绝对值无法直接用于描述和比较系统的缺水程度, 基于 Vogel等^[20]、McMahon等^[22-23]的建议, 本文引入需水率这一变量:

$$YI = \frac{Yield}{\mu} \quad (1)$$

式中: $Yield$ 为年需水量; YI 为需水率, 该变量表征年需水量占多年平均来水量的比值, 无量纲变量。

此外, Vogel等^[17, 20]在水资源系统分析中提出了标准净入流 m (standard net inflow)这一变量, 以此来描述供水系统水资源量的丰沛程度, m 越大代表水资源系统的可利用水资源量越充足:

$$m = \frac{1 - YI}{C_V} \quad (2)$$

如式(2)所示, 标准净入流 m 综合考虑了年径流量均值、变差系数和需水量3个变量, 可减少供水系统影响因素的个数。在本项研究中, 一方面将利用该变量对实验样本进行分类, 以降低样本分类的复杂性; 另一方面, 利用该变量来减少样本多元回归分析的自变量个数, 但同时将标准净入流 m 拆分为 YI 和 C_V 两个自变量进行分析, 并对多组自变量组合的拟合优度进行对比, 具体结果将在第4节中介绍。

(3)水库库容大小在一定程度上反应了供水系统的调蓄节能能力, 但是无法体现其真实性能, 本文采用库容系数 β 衡量供水系统调蓄能力:

$$\beta = \frac{S_{active}}{\mu} \quad (3)$$

式中: S_{active} 为供水系统的总兴利库容, β 为库容系数, 无量纲变量。

2.2 供水系统的多元评价指标体系 在供水系统的早期研究中, 常以系统供水量最大或供水保证率最高作为系统规划设计和运行管理的目标。随着人们对于旱缺水的认知程度越来越高, 仅依靠供水保证率已无法全面描述系统的部分缺水时段对社会经济所造成的严重影响, 评价指标体系需要更加全面体现缺水的频率、持续时间、破坏深度三个方面。为此, Hashimoto等^[8]提出了系统可靠性(Reliability)、回弹性(Resilience)、脆弱性(Vulnerability)以完善了供水系统的评价指标体系, 上述3类评价指标被广泛采纳和使用^[24-27]。

(1)系统可靠性(Reliability)用来描述系统发生供水破坏的频率, 供水破坏时段次数越多, 可靠性越低, 通常也将可靠性称为供水保证率^[28-29]:

$$REL = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Z_t \quad (4)$$

式中: N 为模拟分析的总时段数(月或年均可); t 为当前时段; Z_t 为当前时段的状态, 若当前时段满足供水需求, 则 $Z_t=1$, 若当前时段未满足供水需求, 即, 发生供水破坏, 则 $Z_t=0$ 。

(2)回弹性(Resilience)用来描述系统发生供水破坏后的恢复速度, 该指标侧重刻画系统缺水的持续时间, 以避免连续缺水所产生的累积影响^[8, 27, 30]。系统回弹性越大, 破坏所持续的连续时间越短:

$$RES = \frac{\sum_{t=1}^N W_t}{\sum_{t=1}^N Z_t} \quad (5)$$

式中: t 、 N 、 Z_t 的定义与前文一致, W_t 的定义如下:

$$\begin{cases} W_t = 0 & \text{如果 } Z_t = 1 \text{ 和 } Z_{t+1} = 0 \\ W_t = 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

从以上定义可知, W_t 是用来记录模拟期内所发生的连续破坏的次数, $Z_t=1$ 且 $Z_{t+1}=0$ 代表一次连续破坏的开始。式(5)中分子为连续破坏的次数总和, 分母为总的破坏次数, 因此 RES 的倒数可以理解为若干次供水破坏事件所持续时间的平均值。

(3)脆弱性(Vulnerability)用来描述系统破坏的严重程度, 即工程领域常用的破坏深度, 系统脆弱

性越低, 系统缺水的量级越小^[8]。对于一些供水系统而言, 尽管发生缺水事件的概率很低, 但每次破坏的程度很大, 这对大多数用水户(尤其是城市生活、工业用水)而言, 是不可接受的^[31-32], 其计算公式如下:

$$VUL = \frac{\sum_{t=1}^N (Def_t / Dem_t)}{\sum_{t=1}^N (1 - Z_t)} \quad (7)$$

式中: Def_t 为第 t 个模拟时段内(月或年)的缺水量; Dem_t 为第 t 个模拟时段内(年或月)的需水量。

2.3 多元弹性分析方法 对于供水系统而言, 来水、需水、库容等影响因素在变量性质、变化范围等方面存在差异, 且各类影响因素交织耦合在一起, 使得系统评价指标与影响因素之间呈现复杂的非线性关系。因此, 无法直接使用多元线性回归来比较不同因素的对供水系统的影响程度。多元弹性分析方法(Multivariate Elasticity Analysis, MEA)是一种广义的多元回归, 其分析过程基于对因变量变异的全微分定义, 无需对原始数据构造回归模型, 因此不必满足多元线性回归的基本线性假定。此外, 该方法还具有无参数特征, 可以同时处理不同性质、量纲、数量级的变量, 可直接用于量化因变量对不同自变量变化的敏感程度。因此, 本文利用 MEA 方法来建立多种影响因素与多元评价指标之间的关联关系。近年来, MEA 方法在水文研究领域得到许多应用, 例如, 有关学者利用这一方法分析了流域的径流量对降雨、温度、土地利用、取用水等不同变量的敏感程度^[33-35]。该方法对原始分析数据的处理以及计算步骤如下: 首先, 假设因变量 A 的变异由自变量 B 和 C 所引起:

$$dA = \frac{\partial A}{\partial B} dB + \frac{\partial A}{\partial C} dC \quad (8)$$

根据文献[33]的研究, 将各变量的均值作为发生变异的对比点, 代入式(8)可得:

$$A - \bar{A} = \frac{\partial A}{\partial B} (B - \bar{B}) + \frac{\partial A}{\partial C} (C - \bar{C}) \quad (9)$$

在式(9)中的左右各项中分别除以 \bar{A} , 同时在等号右侧各项中分别乘以 \bar{B}/\bar{B} 、 \bar{C}/\bar{C} :

$$\left(\frac{A - \bar{A}}{\bar{A}} \right) = \frac{\partial A}{\partial B} \frac{\bar{B}}{\bar{A}} \left(\frac{B - \bar{B}}{\bar{B}} \right) + \frac{\partial A}{\partial C} \frac{\bar{C}}{\bar{A}} \left(\frac{C - \bar{C}}{\bar{C}} \right) \quad (10)$$

其次, 式(10)中括号内各项定义为变量 a 、 b 、 c ; 同时, 令 $\varepsilon B = \frac{\partial A}{\partial B} \frac{\bar{B}}{\bar{A}}$, $\varepsilon C = \frac{\partial A}{\partial C} \frac{\bar{C}}{\bar{A}}$:

$$a = \varepsilon B \times b + \varepsilon C \times c \quad (11)$$

根据变量的全微分定义可知, 式(11)中的 εB 、 εC 为 MEA 系数, $\varepsilon B=2$ 代表自变量 B 每增加 1%, 会使因变量 A 相应地改变 2%。

最后, 对所有分析样本进行上述处理后, 采用最小二乘法来拟合多元线性回归式(11)便可得到各自变量的 MEA 系数的无偏估计值。

3 实验样本设计

3.1 基本资料收集 收集整理了我 29 座以供水为主要兴利目标的水库的基本信息, 确定水资源供水系统中关键影响因素 YI 、 C_v 、 m 、 β 的变化范围。其中, 15 座水库位于辽宁省, 相关资料来自《辽宁省水资源连通联调方案技术报告》^[36]; 其余 14 座供水水库的资料来自相关文献[37-47], 包括河北省的岗南水库、潘家口水库, 山东省的西大洋水库, 吉林省的新立城水库等。基于以上资料, 我国各供水系统的年径流变差系数 C_v 的变化范围在 0.15 ~ 1.55 之间, 需水率 YI 的变化范围为 0.21 ~ 0.92; 库容系数 β 变化范围为 0.18 ~ 1.89; 标准净入流 m 的变化范围为 0.11 ~ 1.93, 将上述变量的变化范围作为其后实验样本设计的参考依据, 为进一步保证样本的多样性, C_v 的设计范围为 0.15 ~ 1.55, YI 的设计范围为 0 ~ 0.95, β 的设计范围为 0 ~ 2, m 的设计范围为 0 ~ 2。

3.2 随机抽样生成实验样本 实验样本的设计流程如图 2 所示。首先, 考虑供水系统的年均径流量 μ , 年径流变差系数 C_v 两个关键参数, 利用径流随机生成技术获得 300 组径流序列^[48]; 其次, 对需水

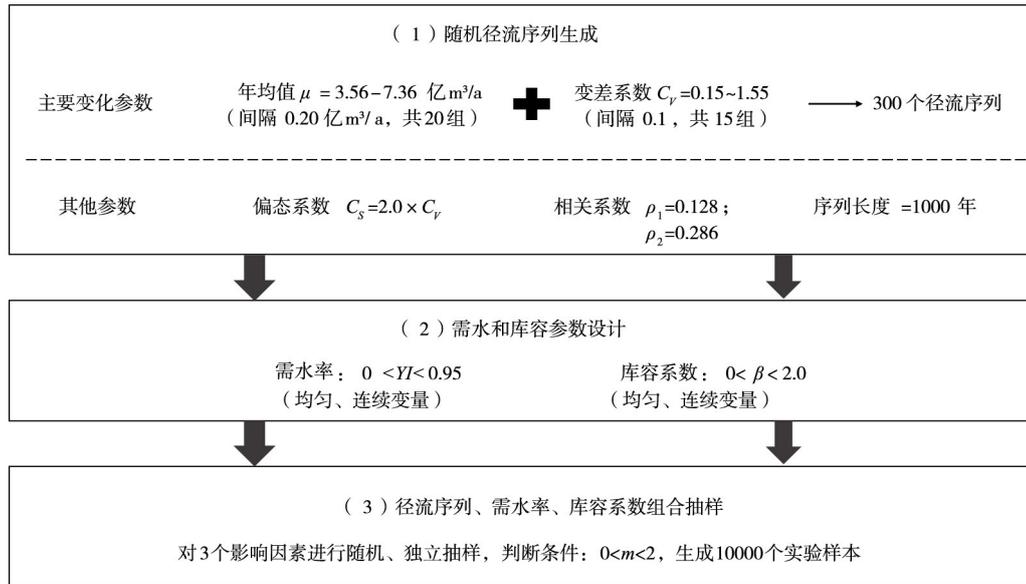


图2 供水系统实验样本的设计思路

率 YI 和库容系数 β 两个关键参数进行抽样设计; 最后, 进行随机、独立的实验抽样, 并根据 YI 和 C_v 计算标准净入流 m , 对生成样本的合理性进行检验, 获得 10 000 个实验样本, 根据式(1)和式(3)可计算得到每个样本真实的需水量、兴利库容。

(1)径流序列生成: 本文在生成径流序列的过程中, 假定年径流序列均服从 P-III 分布, 年径流均值 μ 的设计值为 {3.56, 3.76, 3.96, 4.16, ..., 7.36 亿 m^3/a }, 共 20 组; 年径流变差系数 C_v 的设计值为 {0.15, 0.25, 0.35, 0.45, ..., 1.55}, 共 15 组, 二者相结合共生成 300 个随机径流序列。如前所述, 相较于 μ 、 C_v 两个统计参数, 供水系统对年径流偏态系数 C_s 、年径流自相关系数等统计参数并不敏感^[16]。为此, 参考碧流河水库的历史统计值来设计年径流的相关性系数, 经检验其呈现出二阶自回归特征, 显著性水平为 0.1, 可通过二阶自回归马尔可夫过程, 即 $AR(2)$ 进行随机径流建模^[48]。 $AR(2)$ 模型的参数通过矩量法估算, 一阶和二阶自回归系数分别为 0.128 和 0.286。对于径流量的年内分布规律, 同样参考碧流河水库的历史统计值进行设计。对于年径流偏态系数 C_s , 若该参数变差系数 C_v 的比值不合理, 生成的径流会出现负值, 通过试验发现 $C_s = 2.0 \times C_v$ 可保证其合理性。对于径流序列的长度, 经测试只有其达到 1000 年随机径流的统计参数才是收敛的。

(2)需水率 YI 的变化范围为: $0 < YI < 0.95$, 库容系数 β 的变化范围为: $0 < \beta < 2$ 。结合年径流均值 μ 的设计值可得到各样本需水量、兴利库容的绝对值。

(3)随机抽样: 假定各样本的径流来自 300 组随机生成的径流序列, 服从均匀、非连续分布, 需水率和库容系数服从均匀、连续分布 ($0 < YI < 0.95$, $0 < \beta < 2$), 对来水、需水、库容 3 个影响因素进行随机、独立抽样, 生成 10 000 个基础实验样本。与此同时, 在每次抽样之后需要对标准净入流 m 进行检验, 若不满足其合理范围, 需要剔除该样本并重新抽样, 直至生成满足所有要素合理范围的 10 000 个样本。基于 10 000 个实验样本, 采用 SOP 调度规则^[49]对每个系统的供水过程进行模拟, 得到各时段的缺水量, 并根据式(4)~(7)计算三类评价指标。

4 结果分析与讨论

4.1 多元评价指标的定性变化趋势分析

不同区域的供水系统具有差异化的来水-需水-库容特征, 影响供水系统表现的控制性因素也会随之发生变化。例如, 对水量相对匮乏的区域, 建设水库对供水表现的提升作用较小, 而实施跨流域调水工程则可能显著提升供水表现; 反之, 对水量相对充沛但水库调节能力较小的供水系统而言, 建设水库的作用则较为明显。因此, 有必要针对不同类型的

供水系统实验样本，分别建立多元评价指标与多种影响因素之间的关联关系，进而为不同区域供水系统的规划设计提供有针对性的参考建议。

如前所述，供水系统的特征变量主要涉及来水、需水、水库调蓄三方面。为减少样本分类的复杂性，本文参考 Vogel 等^[17, 19-20]的研究，以标准净入流 m 综合考虑来水、需水对供水系统所带来的影响，同时以库容系数 β 来区分水库调蓄能力的大小，将实验样本分为 4 类：①第 I 类， $0 < m < 1$ ， $0 < \beta < 1$ ，此类样本的水资源总量不充沛，水库调节能力较差；②第 II 类， $1 \leq m < 2$ ， $0 < \beta < 1$ ，此类样本的水资源总量较充沛，但水库调节能力较差；③第 III 类， $0 < m < 1$ ， $1 \leq \beta < 2$ ，此类样本的水资源总量不充沛，水库调节能力较强；④第 IV 类， $1 \leq m < 2$ ， $1 \leq \beta < 2$ ，此类样本的水资源总量较充沛，且水库调节能力也较强。在 4 个分类下定性分析实验样本的可靠性、回弹性、脆弱性随 m 和 β 的变化规律，初步判断多元评价指标与各影响因素的关联关系在不同类型样本下是否具有显著差异，为其后多元回归分析奠定基础。图 3—5 展示的是系统可靠性 REL 、系统回弹性 RES 、脆弱性 VUL 的变化趋势，其中横坐标为标准净入流 m ，纵坐标为库容系数 β ，颜色代表各评价指标的大小。

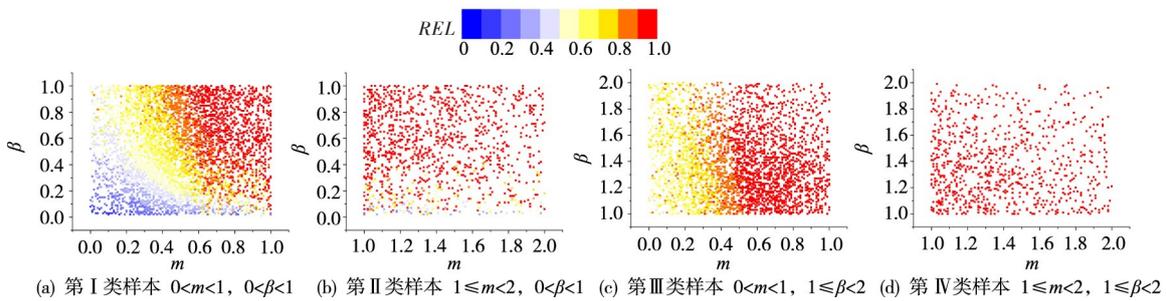


图 3 系统可靠性在不同分类样本中的变化趋势

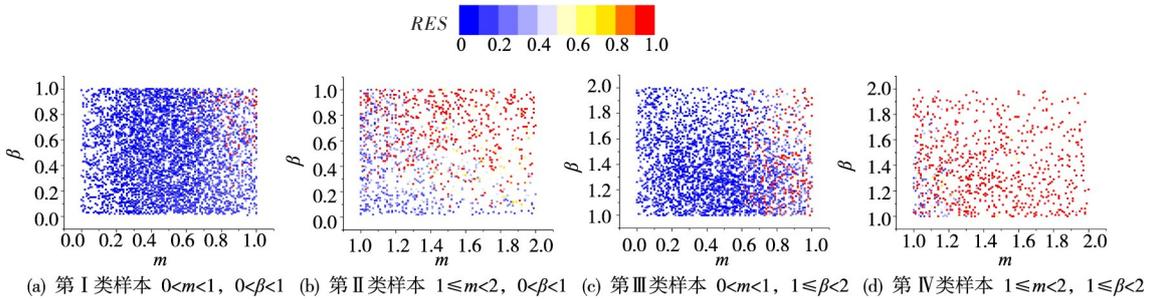


图 4 系统回弹性在不同分类样本中的变化趋势

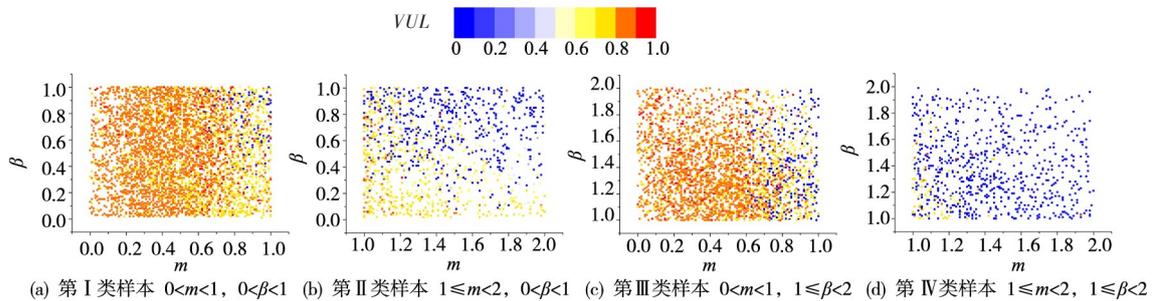


图 5 系统脆弱性在不同分类样本中的变化趋势

对比图 3—5 可知，系统可靠性 REL 随 m 和 β 的变化规律最为明显，在 4 类样本中呈现出截然不同的变化趋势。系统脆弱性 VUL 的变化规律与回弹性 RES 非常相似，在第 I、III、IV 类样本下，这两类指标均在 x 轴方向上变化显著，在 y 轴方向上无明显变化，也就是说，与标准净入流 m 的关系更为密切，但与库容系数 β 的关系相对较弱。即便如此，这两类评价指标在第 I、III、IV 类样本下呈现出

不同的变化幅度，*RES*和*VUL*在3类样本下对自变量的敏感程度存在差异。此外，在第Ⅱ类样本中，样本点的颜色由左下角向右上角呈现显著的变化，也就是说，*m*和 β 的变化均会对两类评价指标产生影响。综上所述，系统可靠性、回弹性、脆弱性在4类样本中呈现出不同的变化趋势，有必要在建立供水系统多元评价指标与不同影响因素的多元回归关系时进行分类研究，后文将通过多元弹性分析对以上现象进一步进行定量解释。

4.2 自变量组合选取与拟合效果评价 如前所述，供水系统的来水需水条件既可以用需水率*YI*和年径流变差系数 C_v 两个变量来进行概化，也可以简化为标准净入流*m*这一个变量，水库调节能力由库容系数 β 来表征。在构建供水系统多元评价指标与影响因素的多元回归关系时，自变量组合可有多种方式，本节初步构建3种自变量组合的方式并根据拟合结果进行优选：①模型1以*m*、 β 为自变量，因为标准净入流*m*中兼顾考虑了来水量、需水量、来水的不均匀性，该模型自变量个数最少；②模型2以 β 、 C_v 、*YI*为自变量，将标准净入流*m*中拆分为两个变量，可在模型中分别考虑来水量和来水不均匀程度的影响；③模型3以*m*、 β 、 C_v 、*YI*为自变量，该模型将所有可控因子均作为自变量，变量个数最多。优选的准则是在拟合优度最好的前提下，选取自变量个数最少的组合。

本文采用*F*检验来判断回归模型的总体回归关系是否具有显著性，*F*值越大说明模型的统计学意义越明显；以决定系数 R^2 来判断模型的拟合优度，决定系数越高则模型的拟合效果越好。在3个自变量组合下对全部样本进行MEA回归分析，结果如表1所示。模型1中所有属性的决定系数 R^2 和*F*值最低，模型2的 R^2 和*F*值最高，模型3的 R^2 与模型2一致，但*F*值低于模型2。这说明，仅以 β 和*m*作为自变量无法有效预测系统评价指标的变化趋势；将*m*中的两项因素拆分开，以 β 、*YI*、 C_v 同时作为自变量时，回归模型的预测效果最好；在此基础上即使再加入自变量*m*，以 β 、*YI*、 C_v 、*m*同时作为自变量也无法进一步提升拟合效果。因此，本文将选择模型2中的自变量进行MEA回归分析。

表1 不同自变量组合下MEA回归分析结果对比

	模型1(β 、 <i>m</i>)		模型2(β 、 <i>YI</i> 、 C_v)		模型3(β 、 <i>YI</i> 、 C_v 、 <i>m</i>)	
	R^2	<i>F</i> 值	R^2	<i>F</i> 值	R^2	<i>F</i> 值
<i>REL</i>	0.528	6325	0.768	11013	0.768	8493
<i>RES</i>	0.250	1070	0.467	3187	0.467	3011
<i>VUL</i>	0.177	607	0.489	2919	0.489	2823

选取模型2中的自变量组合方式，进一步地对4类样本分别构建MEA回归模型(*REL*、*RES*、*VUL*)，每个模型涉及3个MEA系数($\epsilon\beta$ 、 ϵC_v 、 ϵYI)。在决定系数 R^2 和*F*检验的基础上，以*t*检验来判断回归模型中每个MEA系数的显著性。由表2可知：①所有模型*F*检验的*p*值均小于0.05，在95%水平下通过显著性检验，可认为本文所构建的MEA模型大部分具有统计学意义。②95%的显著性水平下进行*t*检验，以此来判断每个MEA系数 ϵ 是否具有统计学意义，有4个MEA系数的*p*值大于0.005(在表2中加粗表示)，未能通过*t*检验，不具有统计学意义。这说明，在此4种情况下，该影响因素变化对相应的评价指标无影响，后文将重点针对通过*t*检验的MEA系数进行分析。③对比3个评价指标在4个分类样本中的拟合优度(决定系数 R^2)，*REL*>*VUL*>*RES*(第Ⅳ类样本除外)，系统可靠性*REL*拟合效果最佳。从三类评价指标的定义可知，可靠性*REL*衡量的是整个模拟时期内的缺水事件发生的概率，与需水率、年径流变差系数、库容系数3个影响因素之间的联系较强。综上，本文所构建的大部分MEA回归分析模型均具有统计学意义，且大部分MEA系数通过显著性检验，相关结果可用来进一步量化比较多元评价指标对不同影响因素的敏感程度。

4.3 多元评价指标对不同影响因素变化的敏感程度分析 本节将利用MEA系数的分析结果，来比较供水系统的3个评价指标*REL*、*RES*、*VUL*对库容系数 β 、年径流变差系数 C_v 和需水率*YI*等3个影响因素变化的敏感程度，及其在不同类型样本中的差异，进而快速地、有针对性地识别出提升供水系统表现的最有效措施。

图6展示了3个评价指标在4个分类中MEA的无偏估计值，不同颜色分别代表3个自变量(*YI*、

表2 不同分类样本下的MEA拟合效果

		第 I 类($0 < m < 1, 0 < \beta < 1$)					第 II 类($1 \leq m < 2, 0 < \beta < 1$)				
		系数的显著性(t 检验)			F 检验	R^2	系数的显著性(t 检验)			F 检验	R^2
		YI	C_v	β	显著性		YI	C_v	β	显著性	
因变量	REL	0.000	0.000	0.000	0.000	0.891	0.000	0.122	0.000	0.000	0.595
	RES	0.000	0.000	0.000	0.000	0.640	0.000	0.000	0.000	0.347	
	VUL	0.018	0.000	0.000	0.000	0.768	0.000	0.000	0.000	0.368	
		第 III 类($0 < m < 1, 1 \leq \beta < 2$)					第 IV 类($1 \leq m < 2, 1 \leq \beta < 2$)				
		系数的显著性(t 检验)			F 检验	R^2	系数的显著性(t 检验)			F 检验	R^2
		YI	C_v	β	显著性		YI	C_v	β	显著性	
因变量	REL	0.000	0.000	0.000	0.000	0.957	0.002	0.749	0.002	0.000	0.278
	RES	0.000	0.000	0.000	0.000	0.676	0.000	0.000	0.538	0.000	0.375
	VUL	0.000	0.000	0.000	0.000	0.745	0.000	0.000	0.624	0.000	0.354

C_v 、 β)。为便于比较分析,图中所展示的MEA系数均为绝对值。由相关定义可知,增加需水率 YI 、年径流的变差系数 C_v 会导致系统可靠性、回弹性下降,脆弱性上升。因此,对于 REL 、 RES 两类评价指标, εYI 、 εC_v 均为负数,对于 VUL , εYI 、 εC_v 均为正数,库容系数 β 对3个评价指标的影响则恰恰相反。具体分析如下:

(1)对于系统可靠性 REL 而言(如图6(a)所示), εYI 、 εC_v 、 $\varepsilon \beta$ 在第 I 类样本中($0 < m < 1, 0 < \beta < 1$)的绝对值最大,这是由于此类型系统水量不充沛,水库调节能力也较差,缺水程度较高,系统可靠性对各影响因素的敏感程度也较高。实施跨流域调水可同时降低 YI 和 C_v ,开展节水管理可降低 YI ,新建或扩建水库可增大 β 。因此,对于第 I 类样本,采取以上措施均可有效改善可靠性指标。在第 II 类样本中($1 \leq m < 2, 0 < \beta < 1$),水资源总量比较充沛,相较于第 I 类样本其缺水程度有所降低,但该类型样本的水库调节能力较差。相比于其他3种类型的供水系统,通过新建或扩建水库来提升系统的调蓄能力(增大 β),充分挖掘利用本地水源,对改进可靠性指标具有较好的效果,降低年径流变差系数 C_v 对改进可靠性指标几乎无影响。在第 III 类样本中($0 < m < 1, 1 \leq \beta < 2$),供水系统调节能力较强,增大 β 对系统可靠性指标的改进效果明显低于 YI 和 C_v ,此时,实施跨流域调水和开展节水管理是改进系统可靠性最有效的手段。在第 IV 类样本中($1 \leq m < 2, 1 \leq \beta < 2$),水资源总量较充沛且水库调节能力也较强,相较于其他3类样本,系统的整体缺水程度最低,仅在特殊枯水年有缺水,系统的可靠性已经很高,3个影响因素的MEA系数均接近0,此时,各种措施对系统可靠性均不会有明显的改进作用。由此可知,3类影响因素对系统可靠性指标的改进作用呈现明显的边际效益递减规律。例如,在库容系数 β 小于1.0的第 I 类和第 II 类样本中,增大 β 均会有效改进系统可靠性;而在库容系数 β 大于1.0的第 III 和第 IV 类样本中,增大 β 的作用十分有限。面向不同区域的来水-需水-库容特征,决策者需在跨流域调水、节水管理、修建水库等措施中有针对性地选择最有效的改进方案。

(2)对于系统回弹性 RES 而言(如图6(b)所示),3个系统影响因素的MEA系数具有明显的排序规律: $\varepsilon C_v > \varepsilon YI > \varepsilon \beta$ 。以年径流变差系数 C_v 为例,系统回弹性 RES 的MEA系数 εC_v 为1.2~2.6,年径流变差系数 C_v 每减少1%,系统回弹性 RES 可改进1.2%~2.6%。与 C_v 和 YI 相比,库容系数 β 的变化对 RES 的影响非常小,供水系统很难通过增加水库库容来改进系统回弹性。进一步,对系统回弹性指标的

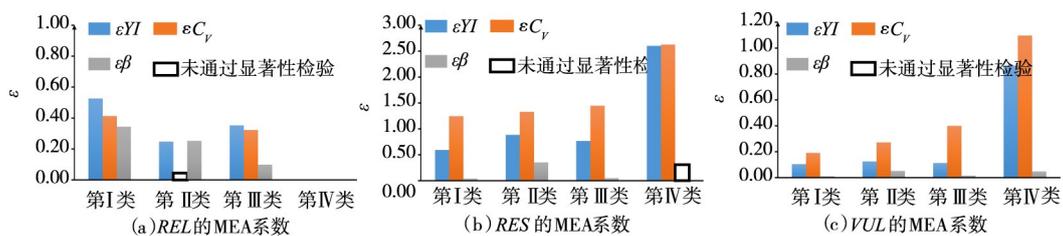


图6 不同分类样本中多元评价指标MEA系数的无偏估计绝对值

定义进行解析可知,该指标关注的是局部时段内持续干旱缺水所带来的影响,而非整个模拟期内的平均表现,因此与特枯年份、连续枯水年的系统的表现更加密切相关。在此期间,来水量与需水量之间的差异较大,若想通过水库蓄水来降低供需差异则需要较大的库容值,受限于资金、地形等因素,库容系数的取值一般小于2.0,因此,在合理范围内增大 β 无法有效地减小供水系统在特枯时期的缺水量。对比3个影响因素,降低来水的不均匀性(C_V)可减少特枯、连枯水文事件发生的概率,对提升系统回弹性最有效。因此,通过合理的跨流域调水、非常规水源使用或加强应急备用水源地建设,在特殊枯水年增加可用水量,降低来水的不确定性,是改进系统回弹性的最有效措施。此外,与系统可靠性不同,系统回弹性在第IV类样本下的MEA系数最大,在第I—III类样本中供水系统的整体缺水程度偏大,改变 C_V 和 YI 对一般枯水年的供水表现有显著改进,但无法有效降低系统在连续枯水年或特枯水年的供水破坏持续时间,导致系统回弹性无显著改进。在第IV类样本下,水资源总量较充沛,且水库调节能力也较强,系统的整体缺水程度较低,在此范围内系统回弹性对 C_V 、 YI 两个影响因素也更加敏感。由以上分析可知,若要改进系统的回弹性指标,应从跨流域调水、备用应急水源建设、非常规水利用等方面进行系统设计,尤其是对第IV类样本,其改进效果最显著。

(3)对于系统脆弱性 VUL 而言(如图6(c)), εYI 、 εC_V 、 $\varepsilon \beta$ 在4类样本中的变化规律与系统回弹性相似。 εYI 、 εC_V 在IV类样本中取得较大值,在I—III类样本中较小,同时,库容系数 β 对系统脆弱性的影响非常小。以年径流变差系数 C_V 为例,以年径流变差系数 C_V 为例,在I—III类样本中,系统脆弱性 VUL 的MEA系数 εC_V 仅为0.19~0.40;而在第IV类样本中, εC_V 达到1.10。对系统脆弱性指标的定义进行解析可知,系统脆弱性与回弹性类似,该指标更关注局部缺水时段的供水破坏严重程度所带来的影响,因此与供水系统在特枯年份、连续枯水年的表现更加密切。与系统回弹性类似,若要改进系统的脆弱性,需从跨流域调水、备用应急水源、非常规水利用等方面进行系统设计。

5 结论

在城市供水系统中,来水、需水、水库规模等多种影响因素交织耦合在一起,共同影响着供水系统的设计、运行与管理,呈现复杂且难以描述的特点,建立多种影响因素与系统多元评价指标体系之间的联系,挖掘其中的控制性因素,可帮助决策者有针对性选取最有效的供水保障措施。针对这一问题,本文以实验样本生成-样本模拟-样本数据挖掘为主线,基于多元弹性回归分析方法,定量分析了不同类型供水系统中多元评价指标对多影响因素变化的敏感性,挖掘了年径流变差系数 C_V 、需水率 YI 和库容系数 β 的改变对供水系统可靠性、回弹性、脆弱性的普适性影响规律。主要结论如下:

(1)3类影响因素对系统可靠性的改进作用呈现明显的边际效益递减规律。在水量匮乏且调节能力较差的供水系统中,降低需水率 YI 、年径流变差系数 C_V ,增大库容系数 β 均可显著改进系统的可靠性;在水量充沛但调节能力较差的系统中,系统可靠性对库容系数 β 的变化较为敏感;在水量匮乏但调节能力较强的系统中,需水率 YI 和年径流变差系数 C_V 对可靠性的影响均显著大于库容系数 β ;在水量充沛且调节能力较强的系统中,系统可靠性对3个影响因素的变化均不敏感。面向不同区域的来水-需水-库容特征,需要在跨流域调水、节水管理、修建水库等措施中有针对性地选择最有效的改进方案。

(2)对于系统回弹性、脆弱性,不论对于哪种类型的供水系统,其对年径流变差系数 C_V 的变化最敏感,需水率 YI 其次,但对库容系数 β 的变化非常不敏感,无法通过增加水库库容来改进系统的回弹性、脆弱性。这两类指标与供水系统在特枯水年、连枯水年的表现更加密切,在此期间,来水、需水的差值非常大,在合理的范围内增大库容系数 β 对严重缺水事件的改善效果十分有限。降低来水的不均匀性(C_V)可减少特枯、连枯水文事件发生的概率,对提升系统回弹性、脆弱性最有效,为改善这两类指标应着重从跨流域调水、备用应急水源、非常规水利用等方面进行系统设计。

(3)对于水量较充沛且水库调蓄能力也较强的供水系统,其在一般枯水年往往不会缺水,系统可

靠性较高,也因此容易被忽视,但其在特殊枯水年或连续枯水年仍面临一定的缺水风险,进而导致系统的回弹性、脆弱性两类指标较差。对于此类系统,其在特枯水年或连续枯水年的缺水程度低于其他类型的供水系统,实施跨流域调水、备用应急水源、非常规水利用等措施,对回弹性、脆弱性指标的改进效果最为显著。

参 考 文 献:

- [1] 张军,王华.解决城市缺水问题的思考[J].中国水利,2002(5):75-76.
- [2] 于冰,梁国华,何斌,等.城市供水系统多水源联合调度模型及应用[J].水科学进展,2015,26(6):874-884.
- [3] 王煜,彭少明,武见,等.黄河流域水资源均衡调控理论与模型研究[J].水利学报,2020,51(1):44-55.
- [4] 王红瑞,钱龙霞,赵自阳,等.水资源风险分析理论及评估方法[J].水利学报,2019,50(8):980-989.
- [5] 方国华,涂玉虹,闻昕,等.1961—2015年淮河流域气象干旱发展过程和演变特征研究[J].水利学报,2019,50(5):598-611.
- [6] 周惠成,张丹,何斌,等.大连地区旱情趋势及农业抗旱减灾长期对策研究[J].大连理工大学学报,2011,51(1):109-114.
- [7] 张翔,夏军,贾绍凤.干旱期水安全及其风险评价研究[J].水利学报,2005,36(9):1138-1142.
- [8] HASHIMOTO T, STEDINGER J R, LOUCKS D P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water-resource system performance evaluation[J]. Water Resources Research, 1982, 18(1): 14-20.
- [9] ADELOYE A J, MONTASERI M, GARMANN C. Curing the misbehavior of reservoir capacity statistics by controlling shortfall during failures using the modified sequent peak algorithm[J]. Water Resources Research, 2001, 37(1):73-82.
- [10] CELESTE A B. Reservoir design optimization incorporating performance indices[J]. Water Resources Management, 2015,29(12):4305-4318.
- [11] LI Y, ZHANG C, CHU J, et al. Reservoir operation with combined natural inflow and controlled inflow through interbasin transfer: Biliu Reservoir in northeastern China[J]. Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE, 2016,142(2):05015009.
- [12] 徐博.连通条件下大连市供水水库群联合调度研究[D].大连:大连理工大学,2015.
- [13] VIEIRA J, CUNHA M C, LUÍS R. Integrated assessment of water reservoir systems performance with the implementation of ecological flows under varying climatic conditions[J]. Water Resources Management, 2018, 32(15): 5183-5205.
- [14] FOWLER H J, KILSBY C G, O'CONNELL P E. Modeling the impacts of climatic change and variability on the reliability, resilience, and vulnerability of a water resource system[J]. Water Resources Research, 2003, 39(8). doi: 10.1029/2002WR001778.
- [15] NAM W, CHOI J. Development of an irrigation vulnerability assessment model in agricultural reservoirs utilizing probability theory and reliability analysis[J]. Agricultural Water Management, 2014, 142: 115-126.
- [16] MCMAHON T A, PEGRAM G G S, VOGEL R M, et al. Review of Gould-Dincer reservoir storage-yield-reliability estimates[J]. Advances in Water Resources, 2007, 30(9): 1873-1882.
- [17] VOGEL R M, BOLOGNSE R A. Storage-reliability-resilience-yield relations for over-year water-supply Systems [J]. Water Resources Research, 1995, 31(3): 645-654.
- [18] VOGEL R M, STEDINGER J R. Generalized storage reliability yield relationship[J]. Journal of Hydrology, 1987(89):303-327.
- [19] VOGEL R M, LANE M, RAVINDIRAN R S, et al. Storage reservoir behavior in the United States[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1999, 125(5): 245-254.
- [20] VOGEL R M, FENNESSEY N M, BOLOGNESE R A. Storage-reliability-resilience-yield relations for northeastern United-States[J]. Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE, 1995,121(5): 365-374.
- [21] ADELOYE A J. Multiple linear regression and artificial neural networks models for generalized reservoir storage-yield-reliability function for reservoir planning [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14(7):

- 731–738 .
- [22] MCMAHON T A, VOGEL R M, PEGRAM G G S, et al . Global streamflows – Part 2: Reservoir storage–yield performance[J] . Journal of Hydrology, 2007, 347(3/4): 260–271 .
- [23] MCMAHON T A, PEGRAM G G S, VOGEL R M, et al . Revisiting reservoir storage–yield relationships using a global streamflow database[J] . Advances in Water Resources, 2007, 30(8): 1858–1872 .
- [24] SANDOVAL–SOLIS S, MCKINNEY D C, LOUCKS D P . Sustainability Index for water resources planning and management[J] . Journal of Water Resources Planning And Management–ASCE, 2011, 137(5): 381–390 .
- [25] MCMAHON T A, ADELOYE A J, ZHOU S . Understanding performance measures of reservoirs[J] . Journal of Hydrology, 2006, 324(1/4): 359–382 .
- [26] CAI X, MCKINNEY D C, LASDON L S . A framework for sustainability analysis in water resources management and application to the Syr Darya Basin [J] . Water Resources Research, 2002, 38 (6) . doi: 10.1029/2001WR000214 .
- [27] SRINIVASAN K, NEELAKANTAN T R, NARAYAN P S, et al . Mixed–integer programming model for reservoir performance optimization[J] . Journal of Water Resources Planning and Management–ASCE, 1999, 125 (5) : 298–301 .
- [28] 周惠成, 刘莎, 程爱民, 等 . 跨流域引水期间受水水库引水与供水联合调度研究[J] . 水利学报, 2013(8): 883–891 .
- [29] 郭旭宁, 胡铁松, 曾祥, 等 . 基于调度规则的水库群供水能力与风险分析[J] . 水利学报, 2013(6): 664–672 .
- [30] LOUCKS D P . Quantifying trends in system sustainability[J] . Hydrological Sciences Journal–Journal Des Sciences Hydrologiques, 1997, 42(4): 513–530 .
- [31] WEERARATNE J R, LOGAN L, UNNY T E . Performance evaluation of alternate policies on reservoir system operation[J] . Canadian Journal of Civil Engineering, 1986, 13(2): 203–212 .
- [32] MOY W S, COHON J L, REVELLE C S . A programming–model for analysis of the reliability, resilience, and vulnerability of a water–supply reservoir[J] . Water Resources Research, 1986, 22(4): 489–498 .
- [33] SANKARASUBRAMANIAN A, VOGEL R M, LIMBRUNNER J F . Climate elasticity of streamflow in the United States[J] . Water Resources Research, 2001, 37(6): 1771–1781 .
- [34] FU G, CHARLES S P, CHIEW F H S . A two–parameter climate elasticity of streamflow index to assess climate change effects on annual streamflow[J] . Water Resources Research, 2007, 43(11): W11419 .
- [35] ALLAIRE M C, VOGEL R M, KROLL C N . The hydromorphology of an urbanizing watershed using multivariate elasticity[J] . Advances in Water Resources, 2015, 86: 147–154 .
- [36] 辽宁省水利水电勘测设计研究院 . 辽宁省水资源连通联调方案技术报告[R] . 2012 .
- [37] 梁胜行 . 基于生态流量逐级保证的河口村水库水量分配研究[D] . 郑州: 郑州大学, 2018 .
- [38] 李爽 . 潘家口等水库群的供水调度研究[D] . 郑州: 华北水利水电大学, 2017 .
- [39] 王春华 . 基于济南水源供水和生态需水现状下的水资源优化配置研究[D] . 济南: 山东大学, 2017 .
- [40] 王通 . 石头河水库年径流预报模型研究[D] . 杨陵: 西北农林科技大学, 2017 .
- [41] 王鹏全 . 金昌市水库群联合供水优化调度研究[D] . 兰州: 兰州理工大学, 2016 .
- [42] 李靖 . 河川径流特征及影响因素分析研究[D] . 太原: 太原理工大学, 2015 .
- [43] 郭宏伟 . 岗南水库供水调度图编制方法研究[J] . 水电自动化与大坝监测, 2014, 1(38): 45–46 .
- [44] 李维硕 . 莱芜市金水河水库建设水资源论证方法研究[D] . 济南: 山东大学, 2014 .
- [45] 赵金冬, 梁冰 . 新立城水库供水与调度方案探讨[J] . 能源与节能, 2012(4): 50–51 .
- [46] 杨盈, 陈贺, 于世伟, 等 . 基于改进调度图的西大洋水库综合调度研究[J] . 水力发电学报, 2012, 31(4): 139–144 .
- [47] 王加全 . 面向生态需水的随机动态规划水库调度模型研究及应用[D] . 郑州: 郑州大学, 2012 .
- [48] CHI Z, WEI D, YU L, et al . Cost–benefit framework for optimal design of water transfer systems[J] . Journal of Water Resources Planning and Management–ASCE, 2019, 5(145): 4019007 .
- [49] STEDINGER J R, SULE B F, LOUCKS D P . Stochastic dynamic–programming models for reservoir operation optimization[J] . Water Resources Research, 1984, 20(11): 1499–1505 .

Reliability–resilience–vulnerability of water supply system and its response relationship to multiple factors

XU Bo¹, ZHANG Chi¹, JIANG Yunzhong²,

HUANG Qiang³, WANG Guoqing⁴, GUAN Tiesheng⁴

(1. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. School of Water Resources and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an 710077, China;

4. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Urban water supply system is interwoven and coupled by various factors such as inflow, demand, and reservoir regulation, etc. The evaluation indexes of the system also involves many aspects, and the adverse impact caused by extreme drought events in local period cannot be reflected only by the water supply guarantee rate. The study on the correlation between various factors and evaluation indexes can be used to identify the most effective water supply guarantee measures quickly and pertinently, which is of great significance to the design, operation, and management of urban water supply system. This paper took experimental sample generation–sample simulation–sample data mining as the main line and uses random sampling to generate many experimental analysis samples of water supply system. Then the samples were simulated based on standard operation rule and the sample data was mined by multivariate elasticity regression analysis. According to the standard net inflow m and the capacity coefficient β , the samples were divided into four types. This paper quantitatively explored the general correlation between the variation coefficient of annual runoff C_v , water use yield YI , and storage capacity coefficient β of the water supply system and three assessment indexes i.e., system reliability, resilience, and vulnerability. The regression analysis result was further used for quantitatively comparing the sensitivity of multiple assessment indexes to changes in various factors. The results show that: (1) The sensitivity of system reliability to the change of three influencing factors presents a significant law of diminishing marginal benefit, and the characteristics of inflow–demand–storage capacity facing different regions require different water supply measures to be selected. (2) For system resilience and vulnerability, no matter what type of water supply system has the strongest correlation with annual runoff variation coefficient C_v , followed by water demand rate YI and least affected by reservoir capacity coefficient β . Therefore, the system design should be carried out from the aspects of inter–basin water transfer, standby emergency source construction and unconventional water utilization. (3) The systems with abundant water and strong reservoir regulation and storage capacity are easy to be ignored because they will not be short of water in normal dry years. However, they are still faced with the risk of water shortage in special dry years or continuous dry years. The above measures have the most significant improvement effect on its resilience and vulnerability index.

Keywords: water supply system; reliability–resilience–vulnerability; multivariate elasticity; reservoir operation; multifactor analysis

(责任编辑: 韩 昆)