水　利　学　报
2019年8月　SHUILI　XUEBAO　第50卷　第8期

文章编号:0559-9350(2019)08-0980-10

水资源风险分析理论及评估方法

王红瑞[1]，钱龙霞[2]，赵自阳[1]，王　颖[3]

（1. 北京师范大学 水科学研究院-城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室，北京　100875；
2. 南京邮电大学 理学院，江苏 南京　210023；3. 北京航空航天大学 空间与环境学院，北京　100191）

摘要：通过分析开展水资源风险研究的重要意义，全面总结了水资源风险理论和评估方法。(1)从不确定性角度论述水资源风险定义；(2)从风险源和承险体角度分析水资源风险的形成要素，系统总结危险性和脆弱性的定义和数学模型；(3)论述了水资源风险理论模型，包括传统模型、积分模型和投入产出模型等；(4)系统论述了水资源脆弱性评估、水资源风险概率预测和水资源风险损失评估的模型和方法，讨论了各种模型的优缺点；(5)指出了影响水资源风险评估建模的重点与难点问题。

关键词：水资源风险；风险理论模型；脆弱性评估；风险概率预测；风险损失评估

中图分类号：TV213.9　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.13243/j.cnki.slxb.20190177

1　研究背景

21世纪以来，随着人口的快速增长和社会经济的迅速发展，世界上许多国家与地区都面临着水资源短缺和水污染严重等问题；同时由于气候变化与人类活动的影响，旱涝灾害频发，这些都对水资源的安全保障及水资源的可持续利用提出了新的挑战[1]。2012年3月发布的第4期《世界水资源发展报告》强调指出：历史经验不足以平衡用水量与未来不断变化的需求之间的关系，要在充满风险和不确定性的环境中管理水资源。因此，开展水资源风险分析研究是合理制定水资源规划、控制和降低风险与损失的重要基础和前提，可为我国水资源风险防范和优化利用提供决策依据和科学咨询。目前，水资源风险分析研究内容包括水资源风险分析理论和水资源风险评估方法。水资源风险分析理论在危险性、脆弱性和水资源风险理论模型等方面存在如下问题：无法避免主观性的影响、忽视了脆弱性的时变特性、需要大量样本等。水资源风险评估研究存在的主要问题包括：模型难以选择、模型参数难以进行准确性估计以及评估结果难以进行可靠性验证等。本文主要从水资源风险定义、水资源风险形成要素和水资源风险理论模型三个方面对水资源风险分析理论进行综述，分析现有研究存在的问题；从水资源风险概率预测、水资源脆弱性评估和水资源风险损失评估三个方面对水资源风险评估方法进行综述，分析国内外研究存在的问题并指出模型改进的方向和发展趋势，最后指出影响水资源风险评估建模的重点与难点问题。

2　水资源风险分析理论

2.1　水资源风险定义　不确定性是风险事件的本质特征，如Aven[2]认为风险是不利事件后果的严重程度及不确定性。由于水资源系统广泛存在随机性、模糊性及灰色性等[3]，现有研究中用随机性、模

收稿日期：2019-03-18；网络首发时间：2019-08-22
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20190821.1130.002.html
基金项目：国家自然科学基金项目(51609254，51879010，51479003)
作者简介：王红瑞(1963-)，教授，博士生导师，主要从事水文与水资源、水资源规划与环境规划等研究。
E-mail：henrywang@bnu.edu.cn

糊性或灰色性来研究或估计水资源风险中的不确定性，包括随机风险、模糊风险和灰色风险。随机风险常用概率估计水资源系统风险中的随机不确定性[4]。然而，概率风险要以大样本为基础，当已有样本和信息不足以用概率来估计风险中的不确定性时，模糊风险和灰色风险理论应运而生，如Huang[5]提出模糊风险的概念，用模糊关系估计风险发生的概率；Jia等[6]将灰色风险理论用于水资源安全风险评价实践中；左其亭等[3]基于灰色系统理论建立灰色风险率、灰色风险度的计算表达式。

由于研究系统往往存在多种不确定性，需要同时考虑，如Karimi等[7]在风险评估模型中考虑了两种不确定性：灾害发生的可能性和强度的不确定；灾害参数和损失之间关系的不确定，并且称这两种不确定性分别为随机性和模糊性，用模糊概率来表示风险。Liu等[8]在水污染安全风险评价建模时同时考虑了随机性和模糊性。王红瑞等[9]考虑了风险系统的模糊不确定性和随机不确定性，认为水资源短缺风险是指在特定的环境条件下，由于来水和用水存在模糊不确定性与随机不确定性，使区域水资源系统发生供水短缺的概率以及由此产生的损失。胡国华、夏军[10]基于概率论和灰色系统理论方法，针对系统的随机不确定性和灰色不确定性，定义了灰色概率、灰色概率分布、灰色概率密度、灰色期望、灰色方差等基本概念。综上所述，研究者主要从一种不确定性或两种不确定性角度对水资源风险进行定义，目前还未见到在水资源风险定义中同时考虑随机性、模糊性和灰色性的研究，总结见表1。

表1　水资源风险定义主要研究概况

角度		代表人物	定义
一种不确定性	随机性	Hashimoto等[13]	用水资源系统失事或非期望事件发生的概率表征水资源系统风险
	模糊性	Huang等[5]	提出自然灾害模糊风险的概念
	灰色性	左其亭等[3]	用水资源系统失事的灰色风险率和灰色风险度表征水资源系统风险
两种不确定性	随机模糊性	王红瑞等[9]	将供水短缺看成是模糊事件，用模糊概率刻画水资源短缺风险
	随机灰色性	胡国华等[10]	用水资源系统的灰色-随机风险率表征水资源风险

2.2　水资源风险形成要素

2.2.1　*危险性*　风险产生和存在与否的第一个必要条件是要有风险源。风险源不但在根本上决定某种风险是否存在，而且还决定着该种风险的大小[11]。风险源是指促使损失频率和损失幅度增加的要素，是导致事故发生的潜在原因，是造成损失的直接或间接的原因。如水资源安全风险源包括自然的水文循环波动、人类对水循环平衡的不合理改变等，水资源供需风险因子包括水文风险因子、水资源量风险因子、可供水量风险因子、需水量风险因子等。总之，不同领域的风险因素表现形态各异，如自然风险因素、经济风险因素、政治风险因素、物理风险因素、道德风险因素及心理风险因素。风险源的性质一般用危险性刻画[12]，水资源风险研究中危险性常被表示成水资源系统处于失事状态的概率[13]，如供水系统处于失事状态的概率等[14-15]、水资源系统发生供水短缺的概率等[4,16]，以上危险性研究仅考虑了致险因子的频率，未考虑致险因子的强度。在自然灾害风险研究中，一般用灾害强度和频率表示危险性[17]，如用评估单元一年内受热带气旋过程影响的次数和风速强度指数表示热带气旋的危险性。钱龙霞等[18-19]基于定积分理论研究水资源供需风险危险性，将危险性定义成供水系统处于不同强度失事状态下的概率，并且提出危险性的数学模型：

$$T(x)=\int_{a}^{x}D(t)f(t)\mathrm{d}t \tag{1}$$

$$D(x)=\begin{cases}0, & 0\leqslant x\leqslant W_{\min}\\ \dfrac{x-W_{\min}}{W_{\max}-W_{\min}} & W_{\min}<x<W_{\max}\\ 1, & x\geqslant W_{\max}\end{cases} \tag{2}$$

式中：x为缺水量；a为缺水量的最小值；$D(x)$、$f(x)$分别为缺水程度和缺水量的概率密度函数，用来刻画水资源系统中广泛存在的模糊性和随机性。

2.2.2 *脆弱性* 承险体是风险的承受者，即风险客体。按照区域人类社会划分，承险体包括：人员、财产及经济活动和生态系统3个部分[17]。脆弱性是描述或刻画承险体状态和性质的重要指标，能够决定风险发生的概率及其造成的损失。关于脆弱性的定义目前学术界还没有统一的认识，Villagrán等[20]对文献中有关脆弱性定义进行总结，认为脆弱性定义主要包括以下3个方面：(1)当某种不利事件引发某种灾害或风险时，承险体系统表现出一种特殊的条件和状态，并且一些指标如敏感性、局限性和控制能力等常被用来刻画这种状态；(2)风险后果；(3)当承险体面对某种危险时，发生不利后果的概率或可能性。脆弱性内涵仍然在不断变化和扩展，由单维度向多维度方向发展，如图1所示[17]。

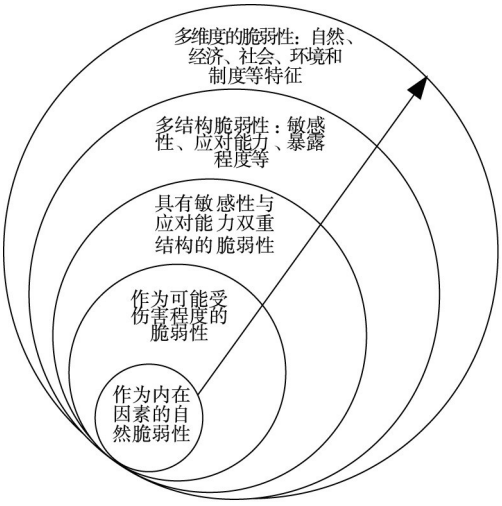


图1 脆弱性概念内涵扩展变化趋势[17]

总结相关研究发现，水资源脆弱性定义没有统一定论，主要有两类：(1)水资源系统易于遭受人类活动、自然灾害威胁或其它危险的影响，且受损后难于恢复到原来的状态和功能的性质或状态[21-24]；(2)水资源系统失事后造成损失的严重程度[4,19]。由图1可知，水资源脆弱性定义还停留在第1阶段和第2阶段，即从承险体内在因素或损失程度方面去刻画水资源脆弱性，如何在水资源脆弱性中刻画外部应对水资源风险的能力或社会经济制度等特征还有待于进一步研究。

有关水资源脆弱性数学模型研究如下：夏军等[21]基于水资源脆弱性机理与概念的函数分析理论与方法，建立水资源脆弱性的数学模型(式(3))，钱龙霞等[24]在分析水资源脆弱性与指标变量之间变化关系的基础上，建立了水资源脆弱性S型函数模型：

$$V=\alpha S(t)/C(t) \tag{3}$$

$$S(x;\ a,\ b)=\begin{cases}0 & x\leqslant a\\ 2\left(\dfrac{x-a}{b-a}\right)^2 & a\leqslant x\leqslant\dfrac{a+b}{2}\\ 1-2\left(\dfrac{x-a}{b-a}\right)^2 & \dfrac{a+b}{2}<x\leqslant b\\ 1 & b<x\end{cases} \tag{4}$$

式中：$S(t)$为敏感性；$C(t)$为抗压力性；x为水资源脆弱性指标的投影值；其它变量注释详见文献[9，31-32]。

式(3)着重从水资源脆弱性概念和内涵角度构建水资源脆弱性数学模型，通过求出敏感性和抗压性进而得到水资源脆弱性，然而没有给出模型构建的理论依据，同时模型系数α的确定无法避免主观性的影响；而式(4)在构建水资源脆弱性评价指标并进行标准化处理的基础上，利用投影寻踪模型投影多维变量投影成一维指标，最后根据评估函数具备的性质和特点构建水资源脆弱性S型函数模型。与式(3)相比，式(4)尽可能避免主观性的影响，只要水资源脆弱性的指标建立的全面合理，即可正

确评估水资源脆弱性。然而，式(4)需要对指标进行降维处理，而在数据处理过程中难免会丢失一些信息，另外以上两种模型均忽视了脆弱性的时变特性，这些问题都有待于今后进一步研究。

2.3 水资源风险理论模型 风险是风险源的危险性和承险体的脆弱性共同作用的结果[19]，其核心是建立风险和危险性、脆弱性之间的数学表达式[25]，主要包括加法公式和乘法公式，如Hahn[26]将风险表示成危险性和脆弱性之和；ISDR (International Strategy for Disaster Reduction)[27]将风险表示成概率和脆弱性的乘积；Dilley等[28]将风险表示成危险性、暴露性和脆弱性的乘积。风险函数模型可以规避综合评价模型的部分缺点(如需要确定指标的权重、指标与风险之间复杂的数学关系式等)，但是也存在一些问题，如风险是由风险源的危险性和承险体的脆弱性相互作用而形成的，这是一个复杂的非线性过程，将风险表示成危险性与脆弱性的线性加权会造成信息失真，甚至会得出不合理或错误的风险评估结果[29]；乘法公式过于简单，无法准确刻画风险和指标之间复杂的定量关系，数学表达式的准确性也值得商榷[30]。黄崇福[30]认为：不管是何种风险，风险函数实质上都是风险源随机性(危险性)的概率密度函数和描述脆弱性的剂量–反应曲线的合成运算，风险值为概率密度函数和剂量–反应曲线围成的面积，当风险退化成风险度时，合成运算可以是乘法运算。因此乘法和加法均为合成运算的特例。

近年来，作者团队针对风险理论模型开展了积极的研究探索，如王红瑞等[9]从模糊概率的角度定义风险，将水资源短缺风险表示成概率密度函数和损失函数乘积的定积分(式(5))，但没有考虑承险体的脆弱性。钱龙霞等[19]提出了危险性、敏感性和脆弱性的函数模型，并建立了风险等级的判别函数模型；钱龙霞等[31]等将风险定义为危险性和脆弱性相互作用而产生的潜在损失，首次提出水资源短缺风险的多重积分模型(式(6))，将危险性和脆弱性相互作用的过程用多重积分表示；钱龙霞等[32]将风险的形成看成是一个“生产过程”，通过投入一定数量的生产要素(危险性和脆弱性)，生产出一定数量的“产品”(损失)，风险是一种产出与投入比，建立了水资源供需风险的数据包络分析模型(式(7))。水资源风险理论模型研究总结见表2。

表2 水资源风险理论模型主要研究概况

种类	代表人物	模型特征
传统模型	Hahn[26]	风险为危险性和脆弱性之和
	ISDR[27]	风险为危险性和脆弱性的乘积
积分模型	王红瑞等[9]	风险为危险性的定积分
	钱龙霞等[31]	风险为危险性和脆弱性的多重积分
数据包络分析模型	钱龙霞等[32]	风险为产出(风险损失)与投入(危险性和脆弱性)的效益系数
判别分析模型	钱龙霞等[19]	风险等级与危险性、脆弱性之间的统计模型

$$R=\int_{W_a}^{+\infty}\mu_w(x)f(x)\mathrm{d}x \tag{5}$$

$$R=\int_a^b\int_p^q f(x)V(y)C(x)\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{6}$$

$$\begin{cases}\min\left\{R-\varepsilon\left(\mathrm{e}^{-\mathrm{T}}s^-+\mathrm{e}^{\mathrm{T}}s^+\right)\right\}=W(\varepsilon)\\ \text{s.t.}\ \sum_{j=1}^{n}X_j\lambda_j+s^-=RX_0,\ j=1,2,\cdots,n\\ \sum_{j=1}^{n}Y_j\lambda_j-s^+=Y_0\\ \lambda_j\geqslant 0,\ j=1,2,\cdots,n,\ s^-\geqslant 0,\ s^+\geqslant 0\end{cases} \tag{7}$$

式中：R为水资源风险系数；$\mu_w(x)$为水资源短缺风险的程度；$C(x)$为风险造成的经济损失，即水资源短缺风险的程度，其它变量注释详见文献[24]。

然而，判别函数模型、多重积分模型和数据包络分析模型均需要模拟风险因子的概率分布，而模拟风险因子的概率分布需要大量样本数据，但目前水资源风险研究中可用的水文水资源数据或信息稀少、零散或缺损，不满足常规统计分析方法所需的样本长度。因此，小样本条件下的水资源风险理论模型仍然需要进一步探索和研究。

3 水资源风险评估方法

王颖等[33]对常见的水资源风险评价方法从数学和统计学的角度进行了全面分析，指出了风险指数法、概率统计方法和模糊方法等评价方法的特色与不足。目前，大部分研究多采用以下思路进行水资源风险评估：采用长系列逐月调算方法对水资源供需平衡进行分析，获得评估年份的风险性能指标，然后选择一种数学模型进行风险评估[18,31-34]。加权综合法[34]、模糊综合评价法[35]和灰色关联分析法[36]和改进层次分析法[37]等方法常被用于风险评估实践中，但它们均需要对指标进行赋权，人为操作痕迹过强[38]。由于评估过程中存在数据处理、定性评估、特殊评估指标的作用，非线性评估模型才能准确刻画评估的本质[39]，因此，支持向量机、D-S证据理论、系统分析思想、动态风险评估理论和蚁群算法[40-44]等一批非线性评估方法逐渐被引入风险评估实践之中。钱龙霞等[18]针对模糊综合评价法无法体现具有突出影响的指标、不能反映评价的本质等问题，将非线性模糊综合评价法引入到水资源供需风险评价中，评价效果与传统的模糊综合评价方法相比表现出一定的优越性。线性模型和非线性模型统称为综合评价模型，一般需要建立能够合理刻画风险各个要素的评价指标体系，评估过程易于操作和实现。但需要建立指标与风险之间的数学模型以及估计模型的未知参数，而样本量的匮乏常常难以保证这些模型的准确性，且难以验证评估结果的可靠性[30]。下面针对水资源脆弱性评估、风险概率预测和风险损失评估的研究工作进行评述。

3.1 水资源脆弱性评估 脆弱性是风险发生的内因和必要条件，也是风险研究的重要组成部分。评价水资源脆弱性的常用方法是综合指数法，即首先建立相应的指标体系，其次对各指标进行赋权，然后利用一些数学模型综合成脆弱性指数[45]。综合指数法主要包括加权综合法和模糊综合评价法[46-47]，如利用加权综合法计算水资源脆弱性指数[34,48]；采用模糊综合评价法评价地下水脆弱性[49]。综合指数法存在一些问题或不足，如在赋权过程中存在较强的主观性[50]；此外，加权综合法和模糊综合评价法均属线性加权评价方法，而评价过程本质是非线性的[51]。为了弥补线性加权法的不足，一些非线性评估方法被应用到脆弱性评价，如RESC模型[52]、集对分析理论等[53]、云模型[54]及函数法等[55]。非线性评估方法仍存在一定局限性，如仍然需要对指标进行赋权、模型参数难以准确估计等[31]。

针对难以构建多维指标评估模型问题，金菊良等[56]和张明等[57]提出“先投影后评估”的思想，建立基于信息提取的评估模型，即利用投影寻踪模型先把高维数据投影到低维子空间上、然后根据该投影值和系统的输出值之间的散点图建立模型(三次曲线、Logistic曲线)对风险进行预测和评估。投影指标函数的构造是投影寻踪模型的关键步骤，相关研究有：金菊良等[56]采用投影值的标准差和投影值与风险之间的相关系数的绝对值的乘积作为投影指标函数，但只有当投影值序列的均值相等时，标准差才能刻画序列的变异程度，这是因为标准差不仅受随机序列变动的影响，而且还受序列平均值的影响[58]；张明等[57]综合考虑投影向量优化中的不确定性，提出基于最大熵原理的多准则投影指标函数，以投影方向平方的熵最大作为准则寻找最优投影方向，而这不能保证投影值最大程度提取了原始数据的变异信息。针对以上不足，钱龙霞等[59]改进发展了一种基于信息熵理论的投影寻踪风险评估模型，克服了传统投影指标函数在某些情形下无法准确刻画序列的变异程度。另一方面，由于脆弱性与指标之间的关联样本稀少，有时无法根据散点图确定函数评估模型的形式，针对该问题，钱龙霞等[24,31]根据评估函数的单调性、有界性和连续平稳性等性质，建立了水资源脆弱性S型函数模型，取得良好效果。水资源脆弱性评估研究总结见表3。

3.2 水资源风险概率预测 风险是指不利事件发生的概率及其损失，因此概率预测也是风险评估的

表3　水资源脆弱性评估主要研究概况

	主要方法	不足
综合指数法	线性评估方法：加权综合法和模糊综合评价	主观性较强、线性模型
	非线性评估方法：RESC模型、集对分析理论、云模型等	无法避免主观性影响、模型参数难以估计
基于信息提取的评估模型	基于投影寻踪的三次曲线模型或Logistic曲线模型、基于投影寻踪的S型函数模型	投影指标函数不够合理、小样本信息使得函数模型参数难以估计

主要内容。1982年，Hashimoto等[13]首次提出水资源系统处于失事状态的概率这个概念，但并未给出求解概率的具体方法。在水资源风险评估研究中常用频率代替概率[61-63]，但是频率和概率之间是有区别的[64]，蒙特卡洛技术常用来计算风险概率，但该方法的计算结果依赖于样本容量和抽样次数[65]。此外，统计方法如判别分析模型、Logistic回归模型也被用来预测水资源风险发生的概率[15]，钱龙霞等[18-19,66]分别建立了Logistic风险概率预测模型和最大熵风险概率预测模型。上述模型的提出在一定程度上丰富了风险概率预测模型，但是上述模型的构建需要大量样本信息，而且最大熵模型对初值非常敏感，收敛性通常难以满足。

多变量概率分布模拟方法也有很多，如多元正态分布法、非参数方法、经验频率法等，但它们应用时均存在一些问题[66]，如多元正态分布法假定各变量都服从正态分布会造成较大误差，非参数方法构造的联合分布存在预测能力相对不足，且构造的联合分布的边缘分布类型未知；经验频率法仅能根据实测资料进行统计，不具备外延预测能力。针对这些问题，钱龙霞等[66]将Copula函数引入到水资源供需风险研究中，针对传统参数估计方法如相关性指标法和极大似然法存在很多局限[66]，基于非线性优化思想估计Copula函数的参数，取得良好效果。然而这些方法均需要一定数量的样本信息，针对水资源风险样本信息的稀少，如何改进Copula函数的参数估计值得进一步研究。由于Copula函数目前尚处于不断发展和完善阶段[67]，在水资源风险研究中也鲜有涉及，还有很大的发展运用空间。水资源风险概率预测研究总结见表4。

表4　水资源风险概率预测研究概况

	主要方法	不足
单变量	频率、蒙特卡洛技术	频率和概率有区别、结果依赖于样本量和抽样次数等
	Logistic风险概率预测模型、最大熵风险概率预测模型	需要大量样本信息、对初值敏感、收敛性难以满足等
多变量	多元正态分布、非参数方法、经验频率等	误差较大、预测能力不够强、不具备外延预测能力等
	Copula函数	参数估计存在很多局限

3.3　水资源风险损失评估　损失是风险的表现方式，对风险造成的损失进行准确预估是风险评估的重要内容[17]。水资源风险损失评估方法可以分为两类：直接评估法和间接评估法。所谓直接评估法，即用缺水量的相关指数来度量水资源系统失事带来的直接损失。如Hashimoto等[13]用缺水量的期望值来度量不利事件发生造成损失的严重程度；阮本清等[35]认为不同缺水量的缺水事件是同频率的，用缺水量的平均值来度量水资源系统失事损失的严重程度；王红瑞等[9,68]构建缺水量的隶属函数和基于循环修正模式的水资源短缺程度评价模型来评价水资源短缺风险损失。间接评估法用来计算水资源系统失事造成的潜在经济损失，常用缺水量乘以水资源价格表示风险损失。该方法的关键问题是如何估计水资源价格或经济价值，水资源定价模型主要有影子价格法[69]、投入产出模型[70]及DHGF算法[71]和效益分摊系数法[72]等。直接评估法忽略了水资源系统和经济系统之间的复杂联系，且认为不同事件是同频率的，缺少相应的理论基础；而间接评估法虽考虑了水资源的经济属性，但是没有考虑随机性，是一种确定性模型。针对上述情况，钱龙霞等[19,73]从工业用水效益、农业用水效益及第三产业用水效益角度研究水资源供需风险经济损失，建立用水效益的数据包络分析模型，并建立风险期望损失的函数表达式，既考虑了风险损失的不确定性，又考虑了水资源的经济属性。然而，数据包络分析法虽然存在一些显著优点如无需任何权重假设、具有很强的客观性等，但也存在一些缺陷，如容易产生评价值过高的问题，可能引起评价结果的不真实性。除此以外，分摊系数法

和Cobb-Douglas生产函数法也是目前计算用水效益的主要方法[74-75]，然而分摊系数法和Cobb-Douglas生产函数法在确定模型参数的过程中均无法避免主观性的影响，因此用水效益的计算仍然需要不断改进，如消除主观性的影响、解决评价值过高的问题等。水资源风险损失评估研究总结见表5。

表5　水资源风险损失评估研究概况

	主要方法	不足
直接评估法	缺水量的期望值或平均值、缺水量的隶属函数	忽略了水资源的经济效益，认为不同失事是同频率的
间接评估法	影子价格法、DHGF算法及效益分摊系数法等 各产业用水效益计算模型、数据包络分析模型	确定性模型 用水效益的计算存在一些问题

4　展望

首先，现有水资源风险概率预测研究中仅考虑了致险因子的频率和强度，而风险是由致险因子的危险性和承险体的脆弱性相互作用而产生的，即风险概率的大小不仅仅与致险因子危险性有关，而且与承险体的脆弱性有关。因此，在建立风险概率预测模型时，需要同时考虑危险性和脆弱性。

其次，统计模型是风险评估的常规方法，而统计模型的建立需要大量风险与风险影响因子之间（危险性和脆弱性）的关联样本信息。由于风险常常难以观测或记录，因而目前水资源风险与水文水资源因子之间的关联数据信息和案例样本极为稀少或缺损严重，可用数据信息仅为少量的试验数据样本或定性经验知识，不满足常规统计方法和信度检验所需要的样本量，即信息不完备性。

最后，由于水资源系统是一个多属性的复杂系统，涉及到水文因子、水资源量因子、可供水量因子、需水量因子和水环境因子等诸多方面，如果建立风险评估模型时将这些因子全部引进，可能会带来维数灾难，科学合理识别主要影响因子和筛选关键特征信息，既可抓住问题的核心、也可简化模型。

综上所述，信息不完备和多维风险指标是影响和制约水资源风险评估建模的重点与难点问题，如何解决信息不完备条件下常规统计模型失效问题，如何在众多风险因子中科学合理筛选关键特征信息，需要进行深入探讨和研究。

参　考　文　献：

[1] 姜秋香，周智美，王子龙，等．基于水土资源耦合的水资源短缺风险评价及优化[J]．农业工程学报，2017，33(12)：136-143．

[2] AVEN T．On how to define，understand and describe risk[J]．Reliability Engineering and System Safety，2010，95：623-631．

[3] 左其亭，吴泽宁，赵伟．水资源系统中的不确定性及风险分析方法[J]．干旱区地理，2003，26(2)：116-121．

[4] GIANNIKOPOULOU A S，GAD F K，KAMPRAGOU E K．Risk-based assessment of drought mitigation options：the case of Syros Island，Greece[J]．Water Resources Management，2017，31(2)：655-669．

[5] HUANG C F．Fuzzy risk assessment of urban natural hazards[J]．Fuzzy Set and Systems，1996，83：271-282．

[6] JIA X L，LI C H，CAI Y P，et al．An improved method for integrated water security assessment in the Yellow River basin，China[J]．Stochastic Environmental Research and Risk Assessment，2015，29(8)：2213-2227．

[7] KARIMI I，HULLERMEIER E．Risk assessment system of natural hazards：A new approach based on fuzzy probability[J]．Fuzzy Sets and Systems，2007，158：987-989．

[8] LIU K F R，KO C Y，FAN C，et al．Incorporating the LCIA concept into fuzzy risk assessment as a tool for environmental impact assessment[J]．Stochastic Environmental Research and Risk Assessment，2013，27(4)：849-866．

[9] 王红瑞，钱龙霞，许新宜，等．基于模糊概率的水资源短缺风险评价模型及其应用[J]．水利学报，2009，

40(7): 813-821 .
[10] 胡国华, 夏军 . 风险分析的灰色-随机风险率方法研究[J] . 水利学报, 2001(4): 1-6 .
[11] 章国材 . 气象灾害风险评估与区划方法[M] . 北京: 气象出版社, 2009 .
[12] 尚志海 . 基于人地关系的自然灾害风险形成机制分析[J] . 灾害学, 2018, 33(2): 5-9 .
[13] HASHIMOTO T, STEDINGER J R, LOUCKS D P . Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation[J] . Water Resources Research, 1982, 18(1): 14-20 .
[14] TIDWELL V C, COOPER J A, SILVA C J . Threat assessment of water supply systems using markov latent effects modeling[J] . Journal of Water Resources Planning and Management, 2005, 131(3): 218-227 .
[15] YU P S, YANG T C, KUO C M, et al . Systematic quantitative risk analysis of water shortage mitigation projects considering climate change[J] . Water Resources Management, 2015, 29(4): 1067-1081 .
[16] YANG C C, YEH C H, HO C C . A stochastic approach for seasonal water-shortage probability forecasting based on seasonal weather outlook[J] . Water Resources Management, 2014, 28(12): 3905-3920 .
[17] 葛全胜, 邹铭, 郑景云, 等 . 中国自然灾害风险综合评估初步研究[M] . 北京: 科学出版社, 2008 .
[18] 钱龙霞, 王红瑞, 蒋国荣, 等 . 基于Logistic回归和NFCA的水资源供需风险分析模型及其应用[J] . 自然资源学报, 2011, 26(12): 2039-2049 .
[19] QIAN L, WANG H, ZHANG K . Evaluation criteria and model for risk between water supply and water demand and its application in Beijing[J] . Water Resources Management, 2014, 28(13): 4433-4447 .
[20] VILLAGRÁN DE LEÓN J . VULNERABILTY . A Conceptual and Methodological Review[M] . SOURCE No .4 . UNU-EHS, Bonn, 2006 .
[21] 夏军, 邱冰, 潘兴瑶, 等 . 气候变化影响下水资源脆弱性评估方法及其应用[J] . 地球科学进展, 2012, 27(4): 443-451 .
[22] LI R, GUO P, LI J . Regional water use structure optimization under multiple uncertainties based on water resources vulnerability analysis[J] . Water Resources Management, 2018, 32(3): 1-21 .
[23] BÄR R, FREUN R E, RAHMAN K, et al . Climate change and agricultural water resources: A vulnerability assessment of the Black Sea catchment[J] . Environmental Science & Policy, 2015, 46: 57-69 .
[24] 钱龙霞, 王红瑞, 张韧, 等 .基于投影寻踪的水资源脆弱性S型函数模型及其应用[J] . 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(1): 185-196 .
[25] WU S H, PAN T, HE S F . Climate change risk research: a case study on flood disaster risk in China[J] . Advances in Climate Change Research, 2012, 3(2): 92-98 .
[26] BOLLIN C, CAMILO Cárdenas, HAHN H, et al . Disatster risk management by communities and local governments[J] . Idb Publications, 2003, 17(6D): 4299-4304 .
[27] International Stategy for Disaster Reduction . Living with Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives Geneva: United Nations[M] . BioMed Central Ltd, 2004 .
[28] DILLEY M, CHEN R S, DEICHMANN U, et al . Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis[M] . Washington, DC: World Bank, 2005 .
[29] SMITH K . Environmental Hazards: Assessing Risk and Reducing Disaster[M] . London: Routledge, 1996 .
[30] 黄崇福 . 风险分析基本方法探讨[J] . 自然灾害学报, 2011, 20(5): 1-10 .
[31] QIAN L, ZHANG R, HONG M, et al . A new multiple integral model for water shortage risk assessment and its application in Beijing, China[J] . Natural Hazards, 2016, 80(1): 43-67 .
[32] 钱龙霞, 张韧, 王红瑞, 等 . 基于Logistic回归和DEA的水资源供需月风险评价模型及其应用[J] . 自然资源学报, 2016, 31(1): 177-186 .
[33] 王颖, 马莉媛, 郁尧, 等 . 关于水资源风险评价数学模型的讨论[J] . 南水北调与水利科技, 2010, 8(2): 69-72 .
[34] WU W Y, YIN S Y, LIU H L . Groundwater vulnerability assessment and feasibility mapping under reclaimed water irrigation by a modified drastic model[J] . Water Resources Management, 2014, 28(5): 1219-1234 .
[35] 阮本清, 韩宇平, 王浩, 等 . 水资源短缺风险的模糊综合评价[J] . 水利学报, 2005, 36(8): 906-912 .
[36] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等 . 灰色关联分析模型研究进展[J] . 系统工程理论与实践, 2013, 33(8): 2041-2046 .

[37] 高媛媛，王红瑞，许新宜，等．水资源安全评价模型构建与应用——以福建省泉州市为例[J]．自然资源学报，2012，27(2)：204-214．
[38] 张晓慧，冯英俊，白莽．一种反映突出影响因素的评价模型[J]．哈尔滨工业大学学报，2003，35(10)：1168-1170．
[39] 侯定丕，王战军．非线性评估的理论探索与应用[M]．合肥：中国科学技术大学出版社，2001．
[40] 娄洋，李宣谕，佟剑杰，等．基于支持向量机的水资源承载能力研究[J]．水利规划与设计，2018(9)：1-44．
[41] 方会超，杭爱．基于D-S证据理论的辽宁省水资源短缺风险评价[J]．地下水，2019，41(2)：125-126．
[42] 韩宇平，阮本清，解建仓，等．串联水库联合供水的风险分析[J]．水利学报，2003(6)：14-21．
[43] ZHANG Q，ZHANG J Q，YAN D H，et al．Dynamic risk prediction based on discriminant analysis for maize drought disaster[J]．Nat Hazards，2013，65：1275-1284．
[44] 赵自阳，李王成，王霞，等．基于蚁群算法的我国水资源短缺风险聚类分析[J]．节水灌溉，2017(7)：70-76．
[45] SCHRÖTER D，POLSKY C，PATT A，et al．Assessing vulnerabilities to the effects of global change：an eight step approach1[J]．Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change，2005，10(4)：573-595 ．
[46] SIMHA P，MUTIARA Z，GAGANIS P．Vulnerability assessment of water resources and adaptive management approach for Lesvos Island，Greece[J]．Sustainable Water Resources Management，2017，3(3)：283-295．
[47] 夏军，邱冰，潘兴瑶，等．气候变化影响下水资源脆弱性的评估方法及其应用[J]．地理科学进展，2012，27(4)：443-451．
[48] SULLIVAN C A．Quantifying water vulnerability：A multi-dimensional approach[J]．Stochastic Environment Research and Risk Assessment，2010，25(4)：627-640．
[49] ASLAM R A，SHRESTHA S，PANDEY V P．Groundwater vulnerability to climate change：A review of the assessment methodology[J]．Science of the Total Environment，2018，612：853-875．
[50] 苏贤保，李勋贵，刘巨峰，等．基于综合权重法的西北典型区域水资源脆弱性评价研究[J]．干旱区资源与环境，2018，32(3)：112-118．
[51] 张晓慧，冯英浚．一种非线性模糊综合评价模型[J]．系统工程理论与实践，2005，25(10)：54-59．
[52] 陈俊旭，赵红玲，赵志芳，等．水资源脆弱性评估的RESC模型及其在东部季风区的应用[J]．应用基础与工程科学学报，2018，26(5)：940-953．
[53] 胡蓓琳，潘争伟，金菊良，等．基于集对分析模型的巢湖流域水资源系统脆弱性评价[J]．水电能源科学，2013，31(10)：21-24．
[54] 赵毅，徐绪堪，李晓娟．基于变权灰色云模型的江苏省水环境系统脆弱性评价[J]．长江流域资源与环境，2018，27(11)：71-79．
[55] KANAKOUDIS V，TSITSIFLI S，PAPADOPOULOU A，et al．Water resources vulnerability assessment in the Adriatic Sea region：the case of Corfu Island[J]．Environmental Science & Pollution Research International，2017，24(25)：1-14．
[56] 金菊良，张欣莉，丁晶．评估洪水灾情等级的投影寻踪模型[J]．系统工程理论与实践，2002，22(2)：140-144．
[57] 张明，金菊良，张礼兵．流域可持续评价的最大熵原理—投影寻踪偶尔模型[J]．地理科学，2007，27(2)：177-181．
[58] 任若恩，王惠文．多元统计数据分析—理论、方法、实例[M]．北京：国防工业出版社，1998．
[59] 钱龙霞，张韧，王红瑞，等．一种改进投影寻踪风险评估函数模型[J]．应用科学学报，2019，37(1)：112-125．
[60] 钱龙霞，王红瑞，张韧，等．基于降维思想的水资源脆弱性非线性评估模型及其应用[J]．工程科学与技术，2017，49(3)：60-67．
[61] CORON C，CALENGE C，GIRAUD C，et al．Bayesian estimation of species relative abundances and habit preferences using opportunistic data[J]．Environmental and Ecological Statistics，2018，25(1)：71-93．
[62] 严登华，袁喆，王浩，等．水文学确定性和不确定性方法及其集合研究进展[J]．水利学报，2013，44(1)：73-82．

[63] 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，2013，44(6)：664-672．
[64] KAPLAN S，GARRICK B J．On the quantitative definition of risk [J]．Risk Analysis，1981，1(1)：11-27．
[65] 刘涛，邵东国．水资源系统风险评估方法研究[J]．武汉大学学报(工学版)，2005，38(6)：66-71．
[66] 钱龙霞，张韧，王红瑞，等．基于Copula函数的水资源供需风险损失模型及其应用[J]．系统工程理论与实践，2016，36(2)：517-527．
[67] 于忱，陈隽，王红瑞，等．多变量Copula函数在干旱风险分析中的应用进展[J]．南水北调与水利科技，2018，16(1)：14-21
[68] 梁媛，许新宜，王红瑞，等．基于循环修正模式的云南省水资源短缺程度分析[J]．自然资源学报，2013，28(7)：1146-1158．
[69] 韩宇平，阮本清．水资源短缺风险经济损失评估研究[J]．水利学报，2007，38(10)：1253-1257．
[70] 黄彬彬，鄢小令，李光锦，等．基于投入产出模型的萍乡市水资源短缺风险的经济评估[J]．人民珠江，2018，39(11)：79-88．
[71] 郭鹏，王敏，王莉芳．基于DHGF算法的水资源定价模型研究[J]．环境保护科学，2012，38(1)：45-49．
[72] 甘泓，汪林，倪红珍，等．水经济价值计算方法评价研究[J]．水利学报，2008，39(11)：1160-1166．
[73] 钱龙霞，张韧，王红瑞，等．基于MEP和DEA的水资源短缺风险损失模型及其应用[J]．水利学报，2015，46(10)：1199-1206．
[74] 袁汝华，朱九龙，陶晓燕，等．影子价格法在水资源价值理论测算中的应用[J]．自然资源学报，2002，17(6)：757-761．
[75] 王茵．水资源利用的经济学分析[D]．哈尔滨：黑龙江大学，2006．

Theory and assessment method of water resources risk

WANG Hongrui[1]，QIAN Longxia[2]，ZHAO Ziyang[1]，WANG Ying[3]

(1. *College of Water Sciences- Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology，Beijing Normal University，Beijing* 100875，*China*；
2. *School of Science，Nanjing University of Posts and Telecommunications，Nanjing* 210023，*China*；
3. *School of Space and Environment，Beihang University，Beijing* 100191，*China*)

Abstract：Significant meanings of researches on water resources risk are analyzed，and theories and methods of water resources risk are summarized comprehensively. First，definitions of water resources risk are discussed in terms of uncertainty. Second，the forming factors of water resources risk are analyzed from the viewpoint of hazard and system，and definitions and models of threat and vulnerability are summarized. Third，theory models of water resources risk are summarized，such as some traditional models，integral models and the input-output model. Fourth，models and techniques of water resources vulnerability assessment，risk probability prediction and risk loss assessment，advantages and disadvantages of these models are discussed. Finally，the crucial and difficult problems which affect assessment modeling for water resources risk.

Keywords：water resources risk；risk theory model；vulnerability assessment；risk probability prediction；risk loss assessment

(责任编辑：王成丽)