

引用格式:梁缘毅,吕爱锋.中国水资源安全风险评价[J].资源科学,2019,41(4):775-789.[Liang Y Y, Lv A F. Risk assessment of water resource security in China[J]. Resources Science, 2019, 41(4): 775-789.] DOI: 10.18402/resci.2019.04.14

# 中国水资源安全风险评价

梁缘毅<sup>1</sup>,吕爱锋<sup>2,3</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101;

3. 中国科学院大学,北京 100049)

**摘要:**水资源安全风险评价是对水资源进行风险管理的重要基础。本文以水资源安全内涵为基础,结合灾害系统论和风险理论,构建了水资源安全风险评价指标体系和水资源安全风险评价模型,并且采用主观AHP(层次分析法)和客观熵权法结合离差平方和最优组合赋权法进行确权,结合近年相关数据指标计算出各省级研究单元的水资源安全风险值,并根据自然断点法划分极高、高、中、低、极低5个风险等级,最后将极高风险、高风险、以及中等风险地区的水资源安全风险类型,划分为水量短缺风险、水质污染风险、干旱风险和洪涝风险。研究结果显示:水量短缺型风险主要分布在京津冀地区、辽宁、山东、河南、宁夏和甘肃地区;水质污染型风险有上海、辽宁、京津冀地区、江苏、吉林、山西、河南和广西地区;干旱型风险有黑龙江、陕西、甘肃、海南、新疆、内蒙和宁夏地区;洪涝型风险有广东和福建地区。针对不同风险类型提出相应的风险防控措施,从而为全国水资源安全管理提供科学有效的依据。

**关键字:**水资源安全;风险评价;权重;指标体系;风险防控;中国

DOI:10.18402/resci.2019.04.14

## 1 引言

20世纪中叶以来,人口规模和用水量的快速增长,引发了越来越突出的用水问题<sup>[1]</sup>,水资源安全问题逐渐成为学界和政府关注的议题。水资源安全风险评价是将风险理论应用于水资源安全领域的具体应用和实践。区别于传统的对水资源安全状态评价的理论和方法,水资源安全风险的评价聚焦于发生水资源不安全事件的概率。而对于水资源管理来讲,水资源安全状态的评价相当于事实管理,水资源安全风险评价将为水资源管理提供事前管理,即识别风险、提前防范。城市化进程加速、经济持续发展,加之未来气候变化对水文循环的改变,都会加剧水资源供需不平衡的局势,进而影响水资源安全,导致未来水资源安全风险增加<sup>[2]</sup>。科

学地对水资源安全进行风险评价是确保水资源可持续利用、避免水资源不安全事件发生带来损失以及保障水资源安全的有效方法<sup>[3]</sup>。

风险理论源自金融保险行业<sup>[4]</sup>。2003年由国际标准化组织(ISO)给出的风险定义为:客观不确定性的影响<sup>[5]</sup>,即风险是由不确定性引起的。随着灾害系统论与风险理论的发展,风险越来越多地运用于灾害风险评价和预测中<sup>[6]</sup>。各种灾害风险评价方法也随之而生,例如1992年国际自然减灾10年中将灾害风险定义为“危险性和脆弱性相结合的产物”;近些年在灾害风险评价中强调了承灾体脆弱性和暴露性<sup>[7]</sup>;同时也有基于危险性、暴露性和脆弱性对全球自然灾害进行风险评价<sup>[8]</sup>。在过去10年,风险理论在水资源安全管理中得到应用。根据风

收稿日期:2018-11-23 修订日期:2018-12-12

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0401307);中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA20010201)。

作者简介:梁缘毅,男,重庆市人,硕士生,主要从事水资源安全管理研究。E-mail: liangyuanyi0804@qq.com

通讯作者:吕爱锋, E-mail: lvaf@163.com



2019年4月

层则是风险属性表征层,即选择的影响水资源系统安全的指标<sup>[16,25]</sup>。在构建评价指标体系时,遵循科学、简明、独立等原则进行分析构建<sup>[26]</sup>。

水资源安全风险中致灾因子危险性是指引起水资源系统不安全事件发生的因素,即从广义水资源安全最本质的水量、水质与旱涝灾害分析,从而尽可能全面、完整、准确地评价水资源安全风险。

致灾因子危险性指标,选取人均可利用水资源量( $H1$ )、降雨变差系数( $H2$ )、万元GDP排污强度( $H3$ )、 $SPI$ 干旱强度( $H4$ )这4个指标(表1)。水量安全采用优于人均水资源量的人均可利用水资源量表征;洪涝易发性用降雨变差系数表征;水质安全即采用万元GDP排污强度表征;干旱强度即3个月尺度干旱指数( $SPI$ )<sup>[27]</sup>以及各干旱等级发生的概率和干旱严重程度,可有效表征土壤水分条件和干旱强度。上述危险性指标覆盖了广义水资源安全的水量、水质以及旱涝灾害3个最基本方面,可以得到全面的水资源安全危险性评价结果。

承灾体暴露性指标,即人口和经济因素,包括人、居住点、环境服务和资源、基础设施、经济和社会或者是文化资产<sup>[28]</sup>。选用人口密度( $E1$ )、人均GDP( $E2$ )和农林牧渔总产值与地区生产总值之比( $E3$ )这3个指标进行表征(表1)。选用人口密度和人均GDP指标,因为人口带动经济,对经济产生驱动是经济发展的重要载体,再结合直观的GDP数据就可以反映出当地的经济状况;其次在各类产业之中,农业用水所占比例最高、农业经济对水资源的依赖性强、水资源不安全事件所带来的水量和水质的变化对农业经济的影响最为明显,因此采用农林牧渔总产值与地区生产总值之比来表征水资源影响下的农业发展指标。

根据IPCC的定义,脆弱性是指系统容易受到影响的程度并且无法应对的不利影响<sup>[29]</sup>。根据压力、状态和响应模式建立脆弱性评价指标体系<sup>[30]</sup>。选取干旱损失与GDP比值( $V1$ )、洪涝损失与GDP比值( $V2$ )、水费占生产成本比重( $V3$ )、水资源开发利用率( $V4$ )、生态用水满足度( $V5$ )、万元工业增加值用水量( $V6$ )、三类以下水质河长占总河长比( $V7$ )、水利投资占GDP比重( $V8$ )、污水处理率( $V9$ )

表1 水资源安全风险评价指标体系

目标层	风险属性层	评价指标层
WR水资源风险	H危险性	H1 人均可利用水资源量/( $m^3$ /人)
		H2 降雨变差系数
		H3 万元GDP排污强度/( $m^3$ /万元)
		H4 干旱强度( $SPI$ )
E暴露性	E1人口密度/(人/ $km^2$ )	E1 人口密度/(人/ $km^2$ )
		E2 人均GDP/(元/人)
		E3 农林牧渔总产值与地区生产总值之比/%
V脆弱性	V1干旱损失与GDP之比/%	V1 干旱损失与GDP之比/%
		V2 洪涝损失与GDP之比/%
		V3 水费占总生产成本之比/%
		V4 水资源开发利用率/%
		V5 生态用水满足度/%
		V6 万元工业增加值用水量/( $m^3$ /万元)
		V7 三类以下水质河长占总河长比/%
		V8 水利投资占GDP之比/%
		V9 污水处理率/%
		V10 是否存在跨流域调水

和是否有跨流域调水( $V10$ )这10个指标对其进行表征(表1)。压力( $P$ )指标,采用干旱损失与GDP之比和洪涝损失与GDP之比来表征水资源安全对农业经济的压力;水费占生产成本比重来表征水资源安全问题对人类社会产生生活压力指标。状态( $S$ )指标,即反映出来的系统在压力作用下的状态表征。采用水资源开发利用率来表示自然水资源利用现状,生态用水满足程度来表示区域内生态的供水程度以及生态状况,万元工业增加值用水量表示工业用水方面的节水情况和用水状态,三类以下水质河长占总河长比来表征水质在压力作用影响下呈现的状态。响应( $R$ )指标采用水利投资与GDP之比,表示政府对水资源旱涝灾害以及其他水资源不安全状态作出的财政支出响应,污水处理率表示人类对水污染作出的反馈,是否存在跨流域调水指标来表征人类社会应对供需水不平衡作出的响应。

### 2.2.2 评价指标计算方法

在上述指标中的 $E1$ 、 $E2$ 、 $V5$ 、 $V6$ 、 $V7$ 、 $V9$ 、 $V10$ 指标可直接获得, $H3$ 、 $E3$ 、 $V1$ 、 $V2$ 、 $V3$ 、 $V8$ 只需要计算数据的比值,其余则是需要经过适当计算获得,计算方式如下:



人均可利用水资源量采用降水所形成的本地水资源量与20%的入境水资源量之和与常住人口总量之比表示,黄河流域省份则是按照“八七分水方案”进行黄河流域水资源分配;降雨变差系数采用年内各月份的降水量进行计算,计算方法如下:

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{N}}}{\bar{y}} \quad (3)$$

式中:  $\bar{y}$  表示月降雨平均值;  $y_i$  表示  $i$  月的降雨量;  $N$  即总体时间序列长度;  $j$  和  $n$  分别表示降水的起始月份。

干旱指数  $SPI$  即标准降水指数,于1993年由McKee等<sup>[31]</sup>提出(计算方法见文献[31]),并且成为全球广泛使用的干旱指数。 $SPI$  相对于其他干旱指数,优点是只需要降水数据,可以通过多个时间尺度进行计算。本文通过1985—2015年各省的月降水数据计算3个月尺度  $SPI$  以及统计得到  $SPI$  数值区间<sup>[32]</sup>,根据表2的划分标准,将  $SPI$  计算值以及各数值区间概率点定量划分为相应的等级<sup>[33]</sup>。最后将量化的等级和概率相乘,从而统计出各评价单元的干旱强度。

水资源开发利用,采用研究单元地表水供水

表2 干旱等级以及概率等级划分<sup>[33]</sup>

Table 2 Division of drought grades and probability grades

干旱等级	$SPI$ 数值	定量干旱等级	概率/%	概率等级
轻微干旱	0 ~ -0.99	1	< 30.0	1
			30.0~33.0	2
			33.0~35.0	3
			> 35.0	4
中等干旱	-1.00 ~ -1.49	2	< 9.0	1
			9.0~10.0	2
			10.0~11.0	3
			> 11.0	4
严重干旱	-1.50 ~ -1.99	3	< 3.5	1
			3.5~4.5	2
			4.5~5.5	3
			> 5.5	4
极其严重干旱	$\leq -2.0$	4	< 1.5	1
			1.5~2.0	2
			2.0~2.5	3
			> 2.5	4

量  $W_{s_{\text{地表}}}$  与地下水供水量  $W_{s_{\text{地下}}}$  之和占水资源总量  $W_{\text{总}}$  的百分比,计算公式如下:

$$r = \frac{W_{s_{\text{地表}}} + W_{s_{\text{地下}}}}{W_{\text{总}}} \times 100\% \quad (4)$$

### 2.2.3 评价指标权重确定

本文采用主客观相结合的方法,即基于离差平方和的最优组合赋权方法进行评价指标的权重确定<sup>[34]</sup>,该方法在组合权重系数以及决策方面得到广泛的运用<sup>[35]</sup>。

首先进行指标原始数据预处理,即归一化<sup>[36]</sup>。评价指标对该风险属性层有不同的影响,大体分为正相关和反相关,因此上述评价指标就可分为成本型指标和效益型指标。

成本型指标计算公式为:

$$B_{ij\text{成本}} = \frac{A_{ij\text{max}} - A_{ij}}{A_{ij\text{max}} - A_{ij\text{min}}} \quad (5)$$

效益型指标计算公式为:

$$B_{ij\text{效益}} = \frac{A_{ij} - A_{ij\text{min}}}{A_{ij\text{max}} - A_{ij\text{min}}} \quad (6)$$

式中:  $A_{ij}$  表示第  $i$  类属性层的  $j$  指标数据值;  $B_{ij\text{成本}}$  和  $B_{ij\text{效益}}$  表示归一化的第  $i$  类属性层的  $j$  指标  $B_{ij}$  的成本型和效益型;  $A_{ij\text{max}}$  和  $A_{ij\text{min}}$  分别表示  $j$  指标中的最大值和最小值。通过公式(5)和公式(6)得到归一化的成本型和效益型指标组合成的矩阵  $B$ , 将矩阵  $B$  称为决策矩阵。同时得到由主观层次分析法计算的权重  $W_1$  与客观熵权法得到的权重  $W_2$  ( $W_1$  和  $W_2$  都是行向量), 再将  $W_1$  与  $W_2$  相结合得到综合权重矩阵

$$W_z = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{bmatrix} \circ$$

进行综合权重的计算时,使各种评价权重计算的综合评价价值尽可能的分散,越分散方案的决策和排序越有利<sup>[37]</sup>。本文采用各决策方案多属性综合评价价值的离差平方和作为其分散程度的度量。

将第  $i_1$  个研究单元的第  $j$  个归一化指标  $B_{i_1j}$  与各个研究单元的综合评价价值  $B_{ij}$  离差平方和定义如下:

$$L_{i_1i_2}(W_z) = \sum_{i_1=1}^m \left[ \sum_{j=1}^n (B_{ij} - B_{i_1j}) W_z \right]^2 \quad (7)$$

式中:  $m$  表示研究单元数量;  $n$  表示指标数量;  $L_{i_1i_2}$  为

2019年4月

离差平方和。

然后使各个研究区之间的离差平方和达到最大:

$$J_{(W_2)} = \sum_{j_1=1}^n \sum_{j_2=1}^n \left[ \sum_{i=1}^m \sum_{i_1=1}^m (B_{ij_1} - B_{i_1j_1})(B_{ij_2} - B_{i_1j_2}) \right] W_{j_1} W_{j_2} \quad (8)$$

式中:  $J_{(W_2)}$  为目标函数;  $W_{j_1}$  与  $W_{j_2}$  是各组指标合赋权系数。然后按照上述方法求得各个风险属性层的  $n \times n$  阶矩阵  $B_1$ , 其中  $n$  为各风险属性层指标个数, 计算公式如下:

$$B_{1ij} = \sum_{i=1}^m \sum_{i_1=1}^m [(B_{ij_1} - B_{i_1j_1})(B_{ij_2} - B_{i_1j_2})] \quad (9)$$

式中:  $B_{1ij}$  为各评价单元和指标的对阶方阵。然后求得目标函数  $J_{(W_2)}$  的最大特征值  $\lambda_{\max}$  和与其对应特征向量  $\theta$ , 并对其进行单位化得到  $\theta_1$ 。

$$\theta_1 = \frac{\theta}{\sum_{i=1}^n \theta} \quad (10)$$

式中:  $n$  表示风险属性层指标数量。最后综合权重  $W$  由  $W_2$  与权重组合系数  $\theta_1$  进行加权计算得到, 计算方式如公式(11)

$$W = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{bmatrix} \times \theta_1 \quad (11)$$

## 2.3 水资源安全风险评价

进行水资源安全风险评价, 首先根据指标体系找到相应的原始数据, 将原始数据分为两类, 即成本型和效益型, 分别与评价目标负相关和正相关。为了消除评价指标量纲带来的影响, 采用公式(5)和公式(6)将其无量纲化, 即将原始数据转化为0~1之间的数值。

然后通过组合赋权得到的权重向量  $W$  和无量纲化评价指标进行加权得到各个风险属性层(危险性、暴露性和脆弱性)的计算值。

$$H = W_H \times B_{ijH}^T \quad (12)$$

$$E = W_E \times B_{ijE}^T \quad (13)$$

$$V = W_V \times B_{ijV}^T \quad (14)$$

公式(12)、(13)和(14)分别是危险性、暴露性和脆弱性计算模型。  $W_H$ 、 $W_E$  和  $W_V$  是各风险属性层的综合权重;  $B_{ijH}^T$ 、 $B_{ijE}^T$  和  $B_{ijV}^T$  为风险属性层指标的归一化转置矩阵。

接下来进行水资源安全风险计算, 按照公式(2)对水资源安全风险进行计算, 得出每个研究单

元的综合风险评价值。由 ArcGIS 自然断点法对计算值进行风险等级划分, 得出极高风险、高风险、中等风险、低风险、极低风险这5个风险等级。

## 2.4 数据来源

考虑到指标在小尺度评价单元获取较难, 因此本文的评价单元是以省级为评价单元, 1985—2015年的降雨数据来源于中国气象科学数据共享网(<http://cdc.cma.gov.cn:8081/home.do>)。其他数据来源于2015年中国各省市的: ①水资源公报<sup>[38]</sup>; ②统计年鉴<sup>[39]</sup>; ③环境状况公报<sup>[40]</sup>; ④国民经济和社会发展公报<sup>[41]</sup>; ⑤相关研究成果<sup>[22]</sup>。

需要说明的是, 由于数据获取困难, 本次研究不包括中国香港、澳门和台湾。

## 3 结果及分析

根据本文所构建的水资源安全风险评价指标体系以及风险评价模型, 对全国现状水资源安全进行风险量化估算。

### 3.1 评价指标权重

利用层次分析法(AHP)<sup>[42,43]</sup>对主观权重进行计算, 得到水资源安全风险评价指标的主观权重  $W_1$ ; 然后采用熵权法<sup>[44,45]</sup>对客观权重进行计算, 得到水资源安全风险评价指标的客观权重  $W_2$ 。  $W_1$  与  $W_2$  的结果见表3。

最后通过基于离差平方和的最优组合赋权方法进行综合权重计算, 得到各风险属性层权重组合系数分别为  $\theta_{1H} = \begin{bmatrix} 0.583 \\ 0.417 \end{bmatrix}$ 、 $\theta_{1E} = \begin{bmatrix} 0.733 \\ 0.267 \end{bmatrix}$ 、 $\theta_{1V} = \begin{bmatrix} 0.614 \\ 0.386 \end{bmatrix}$ , 再根据公式(10)得到综合权重  $W$ (表4)。

表3 水资源安全风险评价指标主客观权重  $W_1$  和  $W_2$

Table 3 Subjective and objective weight of water resources security risk indexes system ( $W_1$  and  $W_2$ )

指标	$W_1$	$W_2$	指标	$W_1$	$W_2$
H1	0.600	0.254	V3	0.033	0.099
H2	0.100	0.250	V4	0.192	0.099
H3	0.100	0.252	V5	0.192	0.097
H4	0.200	0.244	V6	0.099	0.102
E1	0.200	0.323	V7	0.099	0.099
E2	0.200	0.337	V8	0.099	0.105
E3	0.600	0.340	V9	0.033	0.103
V1	0.099	0.094	V10	0.053	0.103
V2	0.099	0.099			

表4 水资源安全风险评价指标综合权重  $W$

Table 4 Comprehensive weight of water resources security risk indexes system ( $W$ )

指标	$W$	指标	$W$
$H1$	0.459	$I3$	0.061
$H2$	0.163	$I4$	0.152
$H3$	0.163	$I5$	0.154
$H4$	0.215	$I6$	0.100
$E1$	0.233	$I7$	0.099
$E2$	0.240	$I8$	0.101
$E3$	0.527	$I9$	0.063
$I1$	0.097	$I10$	0.074
$I2$	0.099		

3.2 中国水资源安全危险性评价结果

首先采用公式(12)对中国各省水资源安全危险性进行计算,得到中国水资源安全危险性计算结果以及其指标贡献度大小如表5所示。

从表中可以看出,北京、天津、河北、山西、山东和河南六省份处于极高危险性等级。由危险性指标贡献度大小可知,北京、天津、河北和山西四省份主要是水量、洪涝危险性较高。四省人均年可利用水资源量不足  $350\text{ m}^3$ , 约占中国人均水资源量的15.2%, 且降雨变差系数偏大容易引起城市内涝; 山东省也是人均年可利用水资源量较低的省份, 人均不足  $400\text{ m}^3$ , 仅占全国平均的17.4%, 加之降水变差

系数和干旱强度偏大, 使得该省处于极高危险性等级; 河南省不仅人均水资源量低, 而且排污量较大、干旱强度高, 水量、水质和干旱三个方面都具有较高的危险性。

宁夏、辽宁、陕西、甘肃和广东处于高危险性等级。其中甘肃和陕西两省主要是干旱强度较大, 干旱危险性高, 加之两地排污强度较大, 有一定的水质污染危险, 因此存在干旱和水质方面的威胁; 辽宁年人均可利用水资源量仅有  $826\text{ m}^3$ , 约为中国平均的36.1%, 且排污强度较高, 水质易于受到污染, 虽然其他指标贡献度相对较低, 但是整体呈现高危险性等级; 广东主要是排污强度大, 降雨变差系数大, 存在水质和洪涝方面的威胁; 宁夏同样是降水变差系数和排污强度偏高所致, 但其位于干旱半干旱地区, 加上降水的不均匀性, 结合历史旱涝灾害记录, 得知该地区主要受到旱涝以及水质威胁。

贵州、海南、四川、江苏、黑龙江、安徽和吉林处于中等危险性等级。其中贵州、海南、安徽和黑龙江地区主要面临干旱和水质威胁; 四川地区排污强度指标偏大且降雨不均易发生洪涝灾害, 呈现水质和洪涝灾害两方面不安全状态; 江苏主要受旱涝灾害和水质污染的威胁; 吉林排污强度偏高, 存在一定的水质危险。

表5 2015年中国各省现状水资源危险性以及危险性指标贡献大小

Table 5 Grades of hazard and contribution of hazard indexes for each province of China in 2015

等级	省份	$H$	$H1$	$H2$	$H3$	$H4$	等级	省份	$H$	$H1$	$H2$	$H3$	$H4$
极高	晋	0.728	0.853	0.523	0.745	0.333	低	皖	0.409	0.240	0.420	0.923	0.667
	冀	0.704	0.889	0.641	0.621	0.000		吉	0.404	0.455	0.370	0.440	0.167
	鲁	0.699	0.826	0.591	0.422	0.500		云	0.395	0.182	0.411	0.920	0.833
	豫	0.693	0.766	0.288	0.789	0.667		浙	0.394	0.416	0.000	0.582	0.500
	津	0.683	1.000	0.587	0.000	0.000		闽	0.384	0.308	0.284	0.552	0.667
	京	0.668	0.981	0.434	0.125	0.000		赣	0.381	0.274	0.136	1.000	0.500
高	宁	0.569	0.538	0.988	0.696	0.167	极低	桂	0.380	0.231	0.193	0.967	0.667
	辽	0.533	0.634	0.350	0.446	0.333		渝	0.364	0.217	0.431	0.506	0.833
	陕	0.531	0.540	0.237	0.480	0.833		湘	0.356	0.293	0.014	0.679	0.667
	甘	0.528	0.537	0.488	0.551	0.500		蒙	0.356	0.372	0.586	0.077	0.333
	粤	0.503	0.391	0.633	0.893	0.500		鄂	0.338	0.255	0.081	0.647	0.667
	贵	0.447	0.285	0.426	0.662	1.000		新	0.313	0.248	0.076	0.660	0.500
中	琼	0.445	0.289	0.415	0.640	1.000		沪	0.267	0.060	0.325	0.427	1.000
	川	0.441	0.283	0.807	0.743	0.500		藏	0.220	0.000	1.000	0.014	0.667
	苏	0.438	0.330	0.725	0.419	0.667		青	0.161	0.000	0.517	0.539	0.167
	黑	0.431	0.330	0.545	0.547	0.667							

2019年4月

云南、浙江、福建、江西、广西、重庆、湖南、内蒙、湖北和新疆处于低危险等级。其中云南、浙江、福建、江西、广西、重庆、湖南、湖北和新疆存在一定的水质污染和干旱灾害威胁;内蒙地区危险性主导因子是干旱。

上海、西藏和青海处于极低危险等级。上海虽然本地水资源量极少,但是位于长江出海口,外部径流来水丰富,且其他指标贡献度低,因此呈现极低危险性等级;西藏人均可利用水资源量极为丰富,虽然降雨变差系数和干旱强度较大,会有一定的干旱威胁,但是整体呈现极低危险性等级;青海人均水资源较多,在3000 m<sup>3</sup>以上,虽然在畜牧业的发展下会带来一定的水质污染问题,但是其他指标低,因此总体呈现极低危险性等级。

### 3.3 中国水资源安全暴露性评价结果

采用公式(13)对中国水资源安全暴露性进行计算,得到中国水资源安全暴露性计算结果及其指标贡献度大小如表6所示。由上文给出的暴露性指标可以得到,暴露性评价主要是水资源呈现不安全状态时对经济、人口以及农业发展的影响。

上海、北京、天津和海南呈现极高暴露性等级。其中上海、北京和天津都是由于高人口密度和高人均GDP,从而对水资源需求高,因此处于极高

暴露性等级;海南则相反,虽然人口密度和人均GDP偏低,但农业经济在其经济体中份额比例高达35%,从而使该地区对农业用水的需求量大和依赖性高,加之该地区的干旱强度相对较高,对农业经济影响大,因此呈现出极高暴露性等级。

江苏、黑龙江、辽宁、新疆、山东、内蒙、吉林和福建呈现出高暴露性等级。江苏和福建主要由于人均GDP较高导致高暴露性等级;黑龙江、吉林和新疆主要是因为农业经济所占整体比值大对水资源的需求量大,尤其是新疆农业经济在GDP占比高达30%,因此呈现高暴露性等级;辽宁和山东则是因为人均GDP高以及农业经济在整体经济所占比值较大,因此呈现高暴露性等级;内蒙人均GDP较高,且由于畜牧业发达,对水资源依赖度较高,从而也呈现出高暴露性等级。

浙江、湖北、广西、河南、贵州、广东、河北和湖南呈现出中等暴露性等级。浙江和广东虽然人均GDP高,但是由于人口密度低和农业经济在其经济结构中占比小,所以当水资源不安全事件发生时对该地区经济发展影响较小,从而呈现中等暴露等级。湖北、广西、贵州、河南、河北和湖南则是因为农业经济比例较高,但由于低人口密度和低人均GDP,因此呈现中等暴露等级。

表6 2015年中国各省现状水资源安全暴露性以及各暴露性指标贡献大小

Table 6 Grades of exposure and contribution of exposure indexes for each province of China in 2015

等级	省	E	E1	E2	E3	等级	省	E	E1	E2	E3
极高	沪	0.613	1.000	0.949	0.000	低	贵	0.296	0.052	0.045	0.720
	津	0.475	0.343	1.000	0.047		粤	0.295	0.157	0.505	0.185
	京	0.456	0.345	0.982	0.011		冀	0.292	0.103	0.172	0.546
	琼	0.453	0.069	0.179	1.000		湘	0.291	0.083	0.203	0.529
高	苏	0.425	0.202	0.756	0.255		皖	0.274	0.114	0.120	0.543
	黑	0.417	0.049	0.163	0.933		川	0.273	0.044	0.130	0.579
	辽	0.410	0.273	0.479	0.438		云	0.272	0.032	0.032	0.684
	新	0.371	0.003	0.170	0.836		陕	0.263	0.047	0.262	0.417
	鲁	0.364	0.166	0.465	0.404		甘	0.262	0.014	0.000	0.699
	蒙	0.355	0.005	0.549	0.412		宁	0.250	0.026	0.216	0.445
	吉	0.354	0.139	0.305	0.558		渝	0.248	0.095	0.320	0.285
	闽	0.349	0.082	0.511	0.379		赣	0.236	0.071	0.129	0.460
中	浙	0.329	0.141	0.629	0.163	极低	青	0.196	0.001	0.184	0.347
	鄂	0.326	0.081	0.299	0.526		晋	0.170	0.061	0.107	0.310
	桂	0.308	0.052	0.110	0.688		藏	0.169	0.000	0.071	0.387
	豫	0.305	0.147	0.158	0.563						



安徽、四川、云南、陕西、甘肃、宁夏、重庆和江西为低暴露性等级。其中安徽、四川、云南和陕西虽然农业经济在整体经济中所占比例较高,但是由于低人口密度和人均GDP,因此总体呈现低暴露性等级。相反重庆虽然人均GDP较高,但由于其他两项指标低,因此表现为低暴露性等级。

青海、山西和西藏则处于极低暴露性等级。三地各项暴露性指标贡献度都非常小,所以三地都呈现极低暴露性等级。

3.4 中国水资源安全脆弱性评价结果

采用公式(14)对中国水资源安全脆弱性进行计算,由此得到中国水资源安全脆弱性以及各指标贡献度大小如表7所示。

北京、天津和河北处于极高脆弱性等级。京津冀地区是中国首都经济圈,同时也是中国水资源最为紧缺的地区之一。高人口密度和高强度经济活动使得该区需水量日益增加,从而导致水资源过度开发利用,进而引起生态环境恶化等一系列生态环

表7 2015年中国各省现状水资源安全脆弱性以及各脆弱性指标贡献大小

Table 7 Grades of vulnerability and contribution of vulnerability indexes foreach province of China in 2015

等级	省份	V	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
极高	津	0.596	0.919	0.000	0.333	1.000	1.000	0.000	1.000	0.603	0.206	0.000
	冀	0.522	0.615	0.013	0.333	0.691	1.000	0.123	0.622	0.732	0.465	0.000
	京	0.504	0.000	0.008	1.000	0.712	1.000	0.033	0.535	0.976	0.356	0.000
高	辽	0.480	1.000	0.001	0.167	0.390	0.178	0.118	0.936	0.740	0.554	1.000
	甘	0.475	0.300	0.152	0.333	0.296	0.667	0.714	0.335	0.549	0.473	1.000
	沪	0.460	0.000	0.013	0.500	0.596	0.000	0.564	0.937	1.000	0.230	1.000
	晋	0.456	0.750	0.088	0.333	0.389	0.444	0.216	0.615	0.483	0.356	1.000
	新	0.440	0.203	0.344	0.333	0.311	0.778	0.441	0.032	0.538	0.376	1.000
	宁	0.434	0.416	0.131	0.333	0.397	0.667	0.390	0.000	0.644	0.312	1.000
	闽	0.428	0.042	1.000	0.333	0.072	0.333	0.726	0.221	0.595	0.271	1.000
	鲁	0.426	0.530	0.016	0.500	0.629	0.444	0.047	0.566	0.912	0.372	0.000
	蒙	0.421	0.829	0.041	0.333	0.169	0.444	0.199	0.401	0.611	0.473	1.000
中	粤	0.398	0.209	0.439	0.500	0.111	0.333	0.365	0.248	0.929	0.149	1.000
	青	0.391	0.180	0.215	0.333	0.019	0.667	0.328	0.037	0.619	0.919	1.000
	赣	0.383	0.064	0.455	0.000	0.058	0.333	1.000	0.078	0.603	0.514	1.000
	桂	0.377	0.114	0.331	0.333	0.058	0.333	1.000	0.076	0.566	0.271	1.000
	黑	0.376	0.072	0.084	0.167	0.215	0.111	0.637	0.440	0.796	0.676	1.000
	陕	0.352	0.158	0.111	0.333	0.133	0.667	0.104	0.330	0.339	0.546	1.000
低	吉	0.352	0.300	0.019	0.167	0.198	0.111	0.352	0.432	0.769	0.595	1.000
	云	0.345	0.309	0.412	0.000	0.075	0.111	0.726	0.144	0.565	0.494	1.000
	豫	0.343	0.003	0.036	0.333	0.385	0.444	0.237	0.622	0.728	0.514	0.000
	苏	0.341	0.006	0.235	0.167	0.393	0.000	0.110	0.733	0.825	0.113	1.000
	藏	0.330	0.000	0.143	0.167	0.000	0.556	0.465	0.000	0.415	1.000	1.000
	琼	0.328	0.027	0.385	0.000	0.112	0.000	0.735	0.064	0.776	0.668	1.000
	鄂	0.320	0.056	0.217	0.000	0.145	0.000	0.913	0.209	0.648	0.352	1.000
	湘	0.302	0.021	0.396	0.000	0.082	0.000	0.925	0.022	0.527	0.479	1.000
	浙	0.298	0.000	0.580	0.167	0.062	0.000	0.268	0.320	0.743	0.267	1.000
	皖	0.289	0.000	0.526	0.167	0.154	0.000	0.462	0.200	0.648	0.000	1.000
极低	川	0.253	0.074	0.411	0.000	0.056	0.000	0.515	0.000	0.568	0.271	1.000
	贵	0.238	0.000	0.575	0.000	0.038	0.000	0.739	0.116	0.000	0.299	1.000
	渝	0.232	0.016	0.160	0.000	0.083	0.000	0.639	0.000	0.499	0.271	1.000



2019年4月

境问题。随着南水北调中线的开通,可一定程度缓解该地区水资源压力,但是水资源短缺情况仍然十分严重,因此该区域呈现出极高脆弱性等级。

辽宁、甘肃、上海、山西、新疆、宁夏、福建、山东和内蒙处于高脆弱性等级。辽宁由于水体受污染比例高(三类以下水质河长占比高达85.2%)和干旱影响导致经济损失比例高,结合排污强度指标、干旱强度指标发现,水质易于受到污染以及对干旱灾害抵抗力低,因此呈现高脆弱等级;宁夏、新疆和甘肃都位于中国西北的干旱半干旱地区,水资源开发利用率高,生态用水满足率低,污水处理率相对较低且极易发生干旱,从而呈现高脆弱性等级;山东作为中国的农业大省,干旱频发,水资源开发利用率高以及生态需水满足度较低,生态用水存在被挤占的现象,从而呈现高脆弱性等级;上海由于水资源开发利用率高,工业用水效率较低以及水质污染严重(三类以下水质河长占比高达85.3%),加上水利投资低,从而呈现高脆弱性等级;福建省城市内涝严重以及工业用水指标偏高,导致一定的经济损失以及工业用水效率低下,从而呈现出高脆弱性等级;山西主要是由于干旱损失高以及水质污染严重,从而呈现高脆弱性等级;内蒙主要由于干旱导致的经济损失大,因此呈现高脆弱性等级。

广东、青海、江西、广西和黑龙江处于中等脆弱

性等级。广东由于洪涝带来的经济损失较大,加上水利投资占比少,从而呈现中等脆弱性等级;青海位于中国西北的干旱半干旱地区,存在一定的干旱损失,加上工业用水效率低,从而呈现中等脆弱性等级;江西和广西工业用水效率相对较低,导致工业用水需求量大,加上该地区易遭受洪涝灾害,因此两地呈现中等脆弱性等级;黑龙江地区则是对水利设施投资低,水资源空间调节能力不强,存在一定的干旱灾后损失的风险,因此呈现中等脆弱等级。

低脆弱性等级区则有陕西、吉林、云南、河南、江苏、西藏、海南、湖北、湖南、浙江和安徽。四川、贵州和重庆则位于极低脆弱性等级。低脆弱性和极低脆弱性等级省份各项脆弱性指标偏低,从而总体呈现低和极低脆弱性等级。

### 3.5 中国水资源安全风险评价分析

由危险性、暴露性和脆弱性评价结果,再结合公式(2)得到中国各省的风险度计算值,并得到中国水资源安全风险以及风险属性贡献度大小如表8所示。

北京、天津、河北、山东和辽宁处于极高风险等级。其中北京、天津、山东和辽宁的极高风险等级都是由极高以及高等级的危险性、暴露性和脆弱性导致。河北虽然暴露性为中等,但是由于极高等级

表8 2015年中国各省现状水资源安全风险值和风险属性贡献大小

Table 8 Grades of water resources security risk and contribution of risk attributions for each province of China in 2015

等级	省份	H	E	V	R	等级	省份	H	E	V	R
极高	津	0.683	0.475	0.596	0.194	中	新	0.313	0.371	0.440	0.051
	京	0.668	0.456	0.504	0.154		吉	0.404	0.354	0.352	0.050
	鲁	0.699	0.364	0.426	0.108		陕	0.531	0.263	0.352	0.049
	冀	0.704	0.292	0.522	0.107		桂	0.380	0.308	0.377	0.044
高	辽	0.533	0.410	0.480	0.105	低	浙	0.394	0.329	0.298	0.039
	沪	0.267	0.613	0.460	0.075		云	0.395	0.272	0.345	0.037
	豫	0.693	0.305	0.343	0.072		鄂	0.338	0.326	0.320	0.035
	黑	0.431	0.417	0.376	0.067		赣	0.381	0.236	0.383	0.034
	琼	0.445	0.453	0.328	0.066		皖	0.409	0.274	0.289	0.032
	甘	0.528	0.262	0.475	0.065		湘	0.356	0.291	0.302	0.031
	苏	0.438	0.425	0.341	0.063		贵	0.447	0.296	0.238	0.031
	宁	0.569	0.250	0.434	0.062		川	0.441	0.273	0.253	0.030
中	粤	0.503	0.295	0.398	0.059	极低	渝	0.364	0.248	0.232	0.021
	闽	0.384	0.349	0.428	0.057		青	0.161	0.196	0.391	0.012
	晋	0.728	0.170	0.456	0.056		藏	0.220	0.169	0.330	0.012
	蒙	0.356	0.355	0.421	0.053						

危险性和脆弱性,因此也呈现极高风险等级。京津冀地区和辽宁人均可利用水资源缺乏,且干旱频发,水资源污染极其严重,三类以下水质比例极高,由危险性贡献度大小可知,上述四地区均为水量水质型风险。山东则由于年人均可利用水资源量少,干旱等级高且频发,同时山东是中国的农业大省,农业方面对水资源的需求量大,导致其整体风险呈现极高的态势,由危险性指标贡献度大小可知山东主要为水量短缺型风险。

上海、河南、黑龙江、海南、甘肃、江苏和宁夏处于高风险等级。上海主要由于高暴露性和脆弱性导致,虽然本地人均水资源量少,但是由于位于长江出海口,入境水资源量极其丰富,弥补了本地水资源量不足的情况。同时高强度人类活动所驱动和承载的经济发展,会导致水质污染,因此上海总体处于高风险等级。由危险性指标贡献度大小可知,上海属于水质型风险。河南则是由于极高危险性导致的高风险等级,此地区水资源量少,年人均可利用水资源量不足 500 m<sup>3</sup>,万元 GDP 排污量相对较高,易于导致水质污染。同时河南是中国农业大省,农业用水需求量大,结合暴露性和脆弱性得出河南为高风险等级。由危险性指标贡献度大小可知,河南省属于水量和水质型风险。黑龙江由危险性和暴露性导致的高风险。黑龙江作为中国重要的农业大省,也是中国干旱情况严重的地区,易产生农业经济损失。同时,用水效率相对较低,水资源浪费较为严重,因此呈现出高风险等级。并且由危险性指标贡献度大小可知,该地区属于干旱型风险。海南是极高暴露性和中等危险性所致高风险,该地区人口密度较小,经济发展相对不发达,农林牧渔总产值占该地区生产总值的 35%,农业用水量约为当地用水总量的 75%。由危险性指标可知该地区降雨分布不均且干旱强度大,存在严重的季节性干旱,对农业经济的威胁十分严重,所以当水资源呈现不安全状态时,农业经济对此的反馈最为突出。因此海南呈现出高风险等级,并由危险性指标贡献度大小可知,海南属于干旱型风险。宁夏和甘肃都是因为高危险性和高脆弱性所致,两地人均可利用水资源量都十分紧缺,尤其宁夏本地水资源量十分稀少,本地降水形成的水资源量仅有 11.6 亿

m<sup>3</sup>,折合人均仅有 152.75 m<sup>3</sup>,供水水源主要源自外部径流注入,水资源开发利用程度高,生态用水满足度低,因此呈现高风险等级。由危险性指标贡献度大小可知,宁夏和甘肃属于水量和干旱型风险。江苏和黑龙江致险因素相同,即危险性和暴露性,该地区入境水资源量充足,人均可利用水资源量为 2853 m<sup>3</sup>,但是排污较为严重且干旱强度大,三类以下水质河长占比高达 66.7%,虽然干旱强度较大,但是干旱损失小,抗旱能力较强,从而整体为高风险等级。由危险性指标贡献度大小可知,江苏属于水质型风险。

广东、福建、山西、内蒙、新疆、吉林、陕西和广西处于中等风险等级。广东人均可利用水资源量丰富,人口密度大,经济发达,用水需求较大,对水资源压力大,但用水效率高,水环境较好。在危险性方面,该地区降雨极不均匀,易发生洪涝灾害。由危险性指标贡献度大小得到广东属于洪涝型风险。山西的危险性和脆弱性为主要致险因素。山西省年人均可利用水资源量仅有 340 m<sup>3</sup>,生态需水满足度较低,同时水质污染严重,加上是中国重要的能源基地,对水资源的需求量较高。虽然经济发展较慢,暴露性低,但是由于高危险性和脆弱性,导致整体呈现中等风险等级。根据其危险性指标的贡献度大小可知,山西为水量水质风险类型。福建、内蒙、新疆和广西致险因素均为暴露性和脆弱性。福建地区对洪涝灾害抵抗能力弱,洪涝灾害带来的经济损失严重。由洪涝经济损失指标和危险性指标贡献度大小可知,福建属于洪涝型风险。内蒙由于畜牧业发展,对水资源依赖强,加之容易受到干旱灾害影响,易于产生干旱经济损失。因此整体呈现中等风险等级。由危险性指标贡献度大小可知,内蒙为干旱型风险。新疆地区农林牧渔总产值在地区总产值中的比例超 30%,农业需水量大,以农业为主的经济结构对水资源依赖性强。该区处于干旱半干旱地区,易于发生干旱,加上生态用水满足度较低,水资源威胁对该地区影响大,因此新疆呈现中等风险等级,属于干旱风险。广西可利用水资源量充足,但是排污量高,易于产生水污染,呈现出中等风险等级,属于水质型风险。吉林人均水资源量丰富,大于国际水资源安全阈值 1700 m<sup>3</sup>,

2019年4月

但排污强度偏高和污水处理率较低,整体呈现低危险性等级,虽然暴露性高,但是由于低脆弱性,因此整体呈现中等风险等级。由危险性指标贡献度大小可知,吉林属于水质型风险。陕西省干旱情况严重,为高危险性等级,但是暴露性和脆弱性都比较低,因此陕西处于中等风险等级,属于干旱风险。

浙江、云南、湖北、江西、安徽、湖南、贵州和四川位于低风险等级。浙江、湖北和湖南虽然暴露性为中等,但是由于低危险性和脆弱性,且三地水资源丰富,水系发达,对风险抵抗力强,因此三省呈现低风险等级。江西虽然脆弱性为中等,但是由于暴露性和危险性低,因此总体为低风险等级。安徽则是危险性为中等,但暴露性和脆弱性都为低等级,因此总体呈现低风险等级。四川省由于盆地地形,四周都为高山且阴雨天较多,导致洪涝发生频次较高。但由于暴露性和脆弱性低,抵抗风险能力强,因此呈现低风险等级。贵州和云南由于干旱和洪涝多发,极其容易对社会以及经济发展带来威胁,分别呈现中等和低等危险性,但是人口密度低,经济发展较为落后,对水资源需求较少,呈现低暴露性,加之其脆弱性低,因此贵州和云南呈现低风险状态。

极低风险等级为重庆、青海和西藏。青海虽然水资源安全风险属性中的脆弱性为中等,但是危险性等级和暴露性等级都为极低,所以根据水资源安全风险函数可知,青海省属于极低风险等级。重庆和西藏地区则是各项风险属性都为低和极低等级,因此两地均为极低风险等级。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

水资源安全风险的研究能够更好地识别区域水资源安全潜在风险,同时能指导风险防控。对于中高风险等级区域通过模型分析,识别风险是由于脆弱性、危险性还是暴露性中的产业结构不合理造成的,进而通过相应因子的合理调控来防控风险,即降低高风险区的脆弱性、调整部分地区的产业结构、提高水资源可利用量和降低排污强度等措施。同时,研究提出了风险类型分类,对于不同的风险类型区,也可以采用对应的措施来降低风险。

水量短缺风险地区需要从脆弱性方面进行调

控。需要加强用水监管,提高用水效率;加强基础水利以及供水设施建设,完善供水系统,提升供水能力;加大和鼓励对非常规水源的开发,大力推广中水利用,从水价和财政方面定制相应的优惠措施;建立兼顾效率和公平合理的定价机制,利用水价杠杆抑制水资源过度消耗。对此类风险类型管控,主要是降低脆弱性,提高用水效率和水资源可利用量,从而降低危险性和风险。

水质风险地区需要从危险性和脆弱性两方面调控。首先加强污水企业的排污监管,严格执行地方政府以及官员的环保考核制度,改变“重经济,轻环保”的发展现状;其次加强污水处理设施建设以及净化污水技术的发展。对此类风险管控,主要从政策到技术两方面降低危险性和脆弱性,使风险等级降低。

旱涝风险地区则需要对脆弱性和暴露性中的产业结构进行调控。首先提升水资源的时空调蓄能力,缓解干旱时段的用水压力以及城市涝灾压力,即修建水库和相关蓄水设施;推广低影响开发(LID)技术对雨水进行收集利用,缓解城市内涝压力以及提高水资源可利用量;调整农业作物的种植结构,降低干旱半干旱地区以及部分水资源短缺地区的灌溉水资源需求量,缓解旱季的用水压力和干旱导致的经济损失<sup>[46]</sup>。对此类风险管控,主要是通过降低脆弱性和调整暴露性中的产业结构,来提升水资源的调蓄能力和降低灌溉需水量,达到降低风险的目的。

本文是在水资源安全风险领域综合分析的初次尝试,对于这方面的研究还有继续改进的部分:

(1)由于水资源系统是复杂开放式的巨系统,涉及的影响因素很多,相关数据难以获取,考虑更多的水效率相关指标,使指标体系得到进一步的完善可以使水资源安全得到更好表征。

(2)目前由于评价指标数据获取性以及评价单元的限制,部分地区信息差异性可能会被模糊掉,加之更长时间序列样本以及更小尺度单元相关评价指标数据获取的难度大。未来评价单元分辨率可以进一步的优化,使评价结果得到更精确的空间分布,即提高空间分辨率,使评价值与实际情况更加匹配。



## 4.2 结论

本文基于灾害风险理论和水资源安全概念内涵,构建了水资源安全风险评价体系以及评价模型,并对中国水资源安全风险现状进行定量化综合评价,使水资源安全风险现状得到更加综合全面的反映。同时采用主客观权重相结合的方法进行综合权重的估算,使权重的信息既体现了主观性又不缺乏客观性,使权重中的信息量更加丰富,结果更加准确。采用SPI干旱指数以及其频率计算干旱强度,即将发生频率以及干旱等级结合,风险事件的频率和发生事件的严重程度得到完整的反映,更好地反映出风险的内涵;其次在进行脆弱性评价中所采用的压力-状态-响应指标模式,各指标相互制约和影响,更好地反映各评价指标与水资源安全风险目标层的因果关系。基于上述方法对中国的水资源安全风险进行综合评价,得出中国各个省级研究单元的水资源安全综合风险评价价值。研究主要结论有:

根据中国各省级单元水资源安全风险评价结果,进行水资源安全的危险性、脆弱性和风险等级划分。为了针对性地风险防控,对研究单元进行风险类型划分,由于低等级和极低等级风险对水资源安全、人类社会经济和生态环境的影响小,受灾之后恢复快,因此结论仅对极高、高和中等这三类等级进行类型分析和提出针对性的风险防控措施。

(1)极高风险等级区分布于华北的北京、天津、河北和山西、华中的河南和华东的山东,主要由水量匮乏和水质恶化导致;高危险性分布于中国西北的陕西、宁夏和甘肃,东北的辽宁以及华南的广东,主要由水量匮乏和气候影响下的干旱和洪涝导致;中等危险性分布于东北的黑龙江,华东的江苏,西南的四川和贵州以及华南的海南,主要由水质恶化和气候影响下的干旱和洪涝导致。

(2)极高脆弱等级区分布于华北的京津冀地区;高脆弱等级区分布于东北的辽宁,华北的山西和内蒙,西北的甘肃、宁夏和新疆以及华东的山东、上海和福建;中等脆弱等级区分布于东北的黑龙江,西北的青海,华东的江西以及华南的广西和广东地区。

(3)由于低风险以及极低风险等级对水资源安全以及其承灾体影响小,灾后恢复快。因此本文仅对评价结果中的极高风险、高风险和中等风险地区结合风险属性中的脆弱性指标和危险性指标贡献率大小,分析得到中国各省所呈现主要水资源安全风险类型。水量短缺风险有京津冀地区、辽宁、山东、河南、宁夏和甘肃地区;水质污染风险有上海、辽宁、京津冀地区、江苏、吉林、山西、河南和广西地区;干旱风险有黑龙江、陕西、甘肃、海南、新疆、内蒙和宁夏地区;洪涝风险有广东和福建地区。

本文从水资源安全内涵展开分析,结合灾害风险理论得到3层次17个指标的水资源安全风险评价体系,涉及水量、水质、旱涝灾害以及上述不利事件对社会、经济以及生态环境的影响,结合主客观综合评价进行水资源安全风险评价,有效避免了信息的流失。

## 参考文献(References):

- [1] Milly P C D, Julio B, Malin F, et al. Climate change. Stationarity is dead: Whither water management?[J]. *Science*, 2008, 319 (5863): 573-574.
- [2] Vörösmarty C J, McIntyre P B, Gessner M O, et al. Global threats to human water security and river biodiversity[J]. *Nature*, 2010, 467(7315): 555-561.
- [3] Zhang X, Xu K, Zhang D. Risk assessment of water resources utilization in Songliao Basin of Northeast China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 67(5): 1319-1329.
- [4] Fischhoff B. Managing risk perceptions[J]. *Issues in Science and Technology*, 1985, 2(1): 83-96.
- [5] Surak J G, Schmidt R H, Rodrick G E. International Organization for Standardization ISO 9000 and Related Standards[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [6] 任鲁川. 区域自然灾害风险分析研究进展[J]. *地球科学进展*, 1999, 14(3): 31-35. [Ren L C. Advance in risk analysis for regional natural disasters[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(3): 31-35.]
- [7] Birch E L. Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability[J]. *Journal of the American Planning Association*, 2014, 80 (2): 184-185.
- [8] Peduzzi P, Dao H, Herold C, et al. Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: The disaster risk index[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2009, 9(4): 1149-



2019年4月

- 1159.
- [9] 韩宇平, 阮本清, 解建仓. 水资源系统风险评估研究[J]. 西安理工大学学报, 2003, 19(1): 41-45. [Han Y P, Ruan B Q, Xie J C. Study on risk evaluation of water resources system[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2003, 19(1): 41-45.]
- [10] Tsakiris G. Flood risk assessment: Concepts, modelling, applications[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2014, 14(5): 1361-1369.
- [11] Wilhite D A, Hayes M J, Knutson C, et al. Planning for drought: Moving from crisis to risk management[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2000, 36(4): 697-710.
- [12] 黄明聪, 解建仓, 阮本清, 等. 基于支持向量机的水资源短缺风险评价模型及应用[J]. 水利学报, 2007, 38(3): 255-259. [Huang M C, Xie J C, Ruan B Q, et al. Model for assessing water shortage risk based on support vector machine[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(3): 255-259.]
- [13] King R S, Richardson C J. Integrating bioassessment and ecological risk assessment: An approach to developing numerical water-quality criteria[J]. Environmental Management, 2003, 31(6): 795-809.
- [14] Walter M T, Walter M F, Brooks E S, et al. Hydrologically sensitive areas: Variable source area hydrology implications for water quality risk assessment[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2000, 55(3): 277-284.
- [15] 王建群, 叶秉如. 水资源规划的风险型决策方法及实例[J]. 水利学报, 1996, (4): 73-78. [Wang J Q, Ye B R. Application of fractal geometry theory in stability of rock and soil slope[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, (4): 73-78.]
- [16] 张士锋, 陈俊旭, 华东, 等. 水资源系统风险构成及其评价: 以北京市为例[J]. 自然资源学报, 2010, 25(11): 1855-1863. [Zhang S F, Chen J X, Hua D, et al. Research on the assessment of water resource system risk-A case study of Beijing[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(11): 1855-1863.]
- [17] 韩宇平, 王永兵, 冯小明. 基于最大熵原理的区域水资源短缺风险综合评价[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(1): 397-399. [Han Y P, Wang Y B, Feng X M. Comprehensive evaluation of regional water resources shortage risk based on the maximum entropy principle[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(1): 397-399.]
- [18] 张翔, 夏军, 史晓新, 等. 可持续水资源管理的风险分析研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(1): 80-83. [Zhang X, Xia J, Shi X X, et al. Study on risk analysis of sustainable management of water resources[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2000, 33(1): 80-83.]
- [19] Kaplan S, Garrick B J. On the quantitative definition of risk[J]. Risk Analysis, 1981, 1(1): 11-27.
- [20] Verro R, Calliera M, Maffioli G, et al. GIS-based system for surface water risk assessment of agricultural chemicals(1): Methodological approach[J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(7): 1532-1538.
- [21] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 1-9. [Shi P J. Theory on disaster science and disaster dynamics[J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(3): 1-9.]
- [22] 贾绍凤. 中国水资源安全报告[M]. 北京: 科学出版社, 2014. [Jia S F. Report on Water Resources Security in China[M]. Beijing: Science Press, 2014.]
- [23] Dilley M, Chen R S, Deichmann U, et al. Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis[M]. The World Bank Hazard Management Unit, 2005, 20(4): 1-145.
- [24] 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. [Zuo Q T, Wu Z N, Zhao W. Uncertainties in water resources system and risk analysis method[J]. Arid Land Geography, 2003, 26(2): 116-121.]
- [25] 贾绍凤, 张军岩, 张士锋. 区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系[J]. 地理科学进展, 2002, 21(6): 538-545. [Jia S F, Zhang J Y, Zhang S F. Regional water resources stress and water resources security appraisal indicators[J]. Progress in Geography, 2002, 21(6): 538-545.]
- [26] Peduzzi P, Dao H, Herold C, et al. Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: The disaster risk index[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2009, 9(4): 1149-1159.
- [27] World Meteorological Organization. Standardized Precipitation Index User Guide[R]. WMO-No. 1090, 2012.
- [28] 颜峻, 左哲. 自然灾害风险评估指标体系及方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(11): 61-65. [Yan J, Zuo Z. Research on natural disaster risk assessment index system and method[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(11): 61-65.]
- [29] Plummer R, de Loe R, Armitage D. A systematic review of water vulnerability assessment tools[J]. Water Resources Management, 2012, 26(15): 4327-4346.
- [30] 刘绿柳. 水资源脆弱性及其定量评价[J]. 水土保持通报, 2002, 22(2): 41-44. [Liu L L. Concept and quantitative assessment of vulnerability of water resource[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 22(2): 41-44.]
- [31] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales[R]. Anaheim: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 1993.
- [32] He B, Wu J, Lu A, et al. Quantitative assessment and spatial characteristic analysis of agricultural drought risk in China[J]. Natural Hazards, 2013, 66(2): 155-166.
- [33] Shahid S, Behrawan H. Drought risk assessment in the western

- part of Bangladesh[J]. *Natural Hazards*, 2008, 46(3): 391–413.
- [34] 陈华友. 多属性决策中的一种最优组合赋权方法研究[J]. *运筹与管理*, 2003, 12(2): 6–10. [Chen H Y. Research on optimal combination determining weights method for multiple attribute decision making[J]. *Operations Research and Management Science*, 2003, 12(2): 6–10.]
- [35] Zhao J, Jin J L, Zhu J Z, et al. Water resources risk assessment model based on the subjective and objective combination weighting methods[J]. *Water Resources Management*, 2016, 30(9): 3027–3042.
- [36] Iglesias A, Garrote L, Flores F, et al. Challenges to manage the risk of water scarcity and climate change in the Mediterranean[J]. *Water Resources Management*, 2007, 21(5): 775–788.
- [37] 王应明. 离差平方和的多指标决策方法及其应用[J]. *中国软科学*, 2000, (3): 110–113. [Wang Y M. Multi-index decision making method of square sum of deviation and its application[J]. *China Soft Science*, 2000, (3): 110–113.]
- [38] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报2016[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *Chinese Water Resources Bulletin 2016* [M]. Beijing: China Water Power Press, 2017.]
- [39] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook 2016* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.]
- [40] 中华人民共和国国家统计局. 中国环境统计年鉴2016[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Environmental Statistics Yearbook 2016* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016.]
- [41] 中华人民共和国国家统计局. 国民经济和社会发展统计公报2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *Statistical Bulletin on National Economic and Social Development 2016* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016.]
- [42] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. *中国安全科学学报*, 2008, (5): 148–153. [Guo J Y, Zhang Z B, Sun Y Q. Study and applications of analytic hierarchy process[J]. *China Safety Science Journal*, 2008, (5): 148–153.]
- [43] Arunraj N S, Maiti J. Risk-based maintenance policy selection using AHP and goal programming[J]. *Safety Science*, 2010, 48(2): 238–247.
- [44] 邹志红, 孙靖南, 任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(4): 552–556. [Zou Z H, Sun J N, Ren G P. Study and application on the entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(4): 552–556.]
- [45] 程启月. 评测指标权重确定的结构熵权法[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(7): 1225–1228. [Cheng Q Y. Structure entropy weight method to confirm the weight of evaluating index[J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2010, 30(7): 1225–1228.]
- [46] 朱一中, 夏军, 谈戈. 西北地区水资源承载力分析预测与评价[J]. *资源科学*, 2003, 25(4): 43–48. [Zhu Y Z, Xia J, Tan G. Measurement and evaluation of water resources carrying capacity of northwest China[J]. *Resources Science*, 2003, 25(4): 43–48.]

# Risk assessment of water resource security in China

LIANG Yuanyi<sup>1</sup>, LV Aifeng<sup>2,3</sup>

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Water resource security risk assessment is an important foundation of water resource risk management. In this paper, based on the definition of water resource security, we combine disaster system theory and risk theory to construct the risk assessment index system of water resources security and the risk assessment model of water resource security. The subjective AHP (Analytic Hierarchy Process) method and objective entropy weight method combined with the optimal combination of deviation square sum weighting method were proposed to determine the index comprehensive weight. And then, the risk level of water resource security of each province was calculated by coupling the above methods and combining with relevant data indexes which were obtained in China's statistical yearbook, each provincial water resources bulletin and some water resources security research results in recent years. And extreme high risk level, high risk level, moderate risk level, low risk level and extreme low risk level of water resources security risk were calculated through the natural break classification method. Finally, the types of water resource security risks in each research unit with extreme high risk level, high risk level, and moderate risk level were calculated based on hazard indicators. The water resources security risk statistical results show that the risk of water resources shortage is identified in Beijing, Tianjin, Hebei, Liaoning, Shandong, Henan, Ningxia, and Gansu provinces. Risk of water quality is found in Shanghai, Liaoning, Beijing, Tianjin, Hebei, Jiangsu, Jilin, Shanxi, Henan, and Guangxi provinces. Drought risks is characterized in Heilongjiang, Shanxi, Gansu, Hainan, Xinjiang, Inner Mongolia and Ningxia provinces. Flood risk is exhibited in Guangdong and Fujian provinces. Through different risk types of water resources security some risk preventive and controllable measures are proposed to manage China's water resources security scientifically to remit and solve the water resources security risk level of each research unit.

**Key words:** water resource security; risk assessment; weight; assessment index system; risk prevention and control; China