

# The Method and Application of Water Vulnerability Assessment in China\*

Jianwu Weng<sup>1</sup>, Jun Xia<sup>1,2</sup>, Junxu Chen<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Process, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing  
Email: chap\_weng@163.com, xiajun6666@gmail.com

Received: Feb. 28<sup>th</sup>, 2012; revised: Mar. 19<sup>th</sup>, 2012; accepted: Mar. 24<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** Water vulnerability research is the focus of water resources research recent days, and is an important method to assess the impact of natural and social-economic factors to the water resources systems, and also could be the basis of adaptation. In this paper, 8 indicators for water vulnerability were identified and categorized including the natural and social-economic factors. The weights of each indicator were calculated by the Analytic Hierarchy Process. The assessment was applied on China, and each province was one assessment unit. The result shows that south China has the lower water vulnerability, and the north China has the higher water vulnerability. The similar assessment results could be caused by various reasons. As the increase of water vulnerability, the social-economic indicators become overwhelming. According to the results, this paper has advanced some adaptations on improving the adaptive ability to climate change and water efficiency, applying the gross water utilization control, using new water resources and control the water pollution.

**Keywords:** Water Resources; Vulnerability Assessment; Indicator System; Climate Change; Adaptation

## 气候变化背景下水资源脆弱性评价方法及其应用分析\*

翁建武<sup>1</sup>, 夏 军<sup>1,2</sup>, 陈俊旭<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京

<sup>2</sup>武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京

Email: chap\_weng@163.com, xiajun6666@gmail.com

收稿日期: 2012年2月28日; 修回日期: 2012年3月19日; 录用日期: 2012年3月24日

**摘 要:** 气候变化背景下水资源脆弱性与适应性是当前国内外水资源研究的热点问题之一。本文以中国省级行政区为评价单元, 针对水资源供需矛盾问题, 开展了气候变化背景下水资源脆弱性评价的指标系统与方法研究。与传统的水资源脆弱性评价不同, 本文提出的脆弱性不仅考虑了自然干旱地理分布的脆弱性要素, 同时考虑了社会经济和环境等方面的联系, 选取了相关的8个指标, 并利用层次分析法确定指标权重。初步研究表明, 水资源脆弱性在南方地区较低, 在北方地区较高; 相同或相近的水资源脆弱性评价结果, 可能是不同原因造成的; 随着水资源脆弱性的增加, 社会经济因素逐渐起主导作用。根据评价结果, 本研究从提升应对气候变化适应能力、提高用水效率、实施用水总量控制、开发新水源和治理水污染等方面提出了相应的适应性对策。

**关键词:** 水资源; 脆弱性评价; 指标体系; 气候变化; 适应性对策

\*基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目“气候变化对中国东部季风区陆地水循环与水资源安全的影响及适应对策”(编号: 2010CB428406)。

作者简介: 翁建武(1981-), 男, 福建龙岩人, 博士后, 主要从事水文水资源管理、水资源评价研究。

## 1. 引言

水是生命之源, 水资源问题历来受到各国各地区政府部门的重视。自工业革命以来, 人类活动引起的下垫面改变、温室气体排放, 造成的全球气候变化已经得到世界公认。气候变化通过降雨、蒸发、径流等影响区域水循环, 改变水资源时空分布, 引发干旱、洪水等极端事件, 对自然环境和社会经济产生重大影响。另一方面, 人口增加与社会经济发展使水资源需求增加, 越来越多的国家和地区面临日益严峻的水资源问题。在此情况下, 气候变化和社会经济双重影响下的水资源脆弱性已经成为目前的研究热点。通过研究区域的水资源脆弱性, 可以分析区域水资源系统受气候和社会经济因素影响的程度和特征, 并以此作为依据提出相应的适应性对策, 提高水资源系统应对气候变化的适应能力, 减少未来不确定性、风险对人类产生的不利影响。未来 30 到 50 年, 是我国经济社会发展的关键时期, 是人口增长压力空前严峻的时期, 也是水资源受气候变化影响显著的时期, 这都对我国未来的水资源管理提出了更高的要求。开展水资源脆弱性研究, 是我国水资源在未来气候变化背景下确保水资源安全、支撑我国社会经济稳定快速发展的重大需求。

## 2. 水资源脆弱性研究进展

水资源脆弱性不仅联系到地表水的水资源供需关系与矛盾, 也联系到地下水的供需问题。据有关文献分析, 水资源脆弱性研究在地下水领域开展的比较早。20 世纪 60 年代, 法国学者 Albinet 和 Marget 提出的地下水脆弱性, 做了一些开创性工作<sup>[1,2]</sup>。以后, 一些学者对水资源脆弱性概念与评价方法进行了多个方面的研究。近年来, 将指数模型与 GIS 结合成为地下水脆弱性评价的研究热点<sup>[3-6]</sup>。Doerfliger 等人用多属性方法结合 GIS 工具研究了瑞士喀斯特地区水资源脆弱性, 为喀斯特地区水资源保护区边界划分提供了依据<sup>[7]</sup>。Dixon 使用 3S(GIS、GPS、RS)集成, 结合模糊数学模型, 评价了美国阿肯色州密西西比河三角洲的地下水脆弱性<sup>[8]</sup>。

20 世纪 90 年代以来, 地表水资源和水资源系统的脆弱性逐渐成为研究热点。Brouwer 和 Falkenmark 利用人类对水资源的依赖性(water dependency)以及区

域水资源的供需平衡(demand-supply balance)状况, 并根据各因子的阈值分析了水资源的脆弱程度<sup>[9]</sup>; FENG Yan 等人从水量变化、水安全、生态安全、管理机制等方面探讨了中国跨境水资源脆弱性及影响因子<sup>[10]</sup>; Domenica Mirauda 等人使用完整性模型作为决策支持系统评估地表水资源脆弱性<sup>[3]</sup>; Lilian (Na'ia) Alessa 等人研究了美国苏厄德半岛的淡水资源脆弱性与弹性<sup>[11]</sup>; Hamouda 等人评价了东尼罗河流域水资源系统脆弱性<sup>[12]</sup>。在国内, 北方缺水地区的水资源脆弱性研究较多, 例如陈康宁等人评价了河北省水资源脆弱性<sup>[13]</sup>, 黄友波等人<sup>[14]</sup>、王明泉等人<sup>[14]</sup>评价了黑河流域水资源脆弱性, 吴青等人分析了黄河源区的水资源脆弱性<sup>[15]</sup>, 白庆芹等人在水资源系统脆弱性的基础上研究了西北泾河流域的河流脆弱性<sup>[16]</sup>, 郝璐和王静爱使用水文模型研究了西辽河支流老哈河流域的水资源脆弱性<sup>[17]</sup>, 刘海娇等人和刘硕等人使用 GIS 方法分别研究了黄河三角洲地区<sup>[18]</sup>和山西阳曲县<sup>[5]</sup>的水资源脆弱性, 吕彩霞等人<sup>[19]</sup>评价了海河流域水资源脆弱性, 张明月等人研究了新疆疏勒河流域昌马灌区水资源脆弱性<sup>[6]</sup>。除此之外, 也有学者研究了南方地区的水资源脆弱性, 如邹君等人分析了南方湿润丘陵地区的水资源脆弱性<sup>[20-25]</sup>, 张笑天等人分析了湖北漳水库灌区的水资源脆弱性<sup>[26]</sup>, 冯少辉等人分析了云南滇中地区的水资源脆弱性<sup>[27]</sup>, 段顺琼等人研究了云南高原湖泊地区的水资源脆弱性<sup>[28]</sup>。

随着气候变化逐渐成为研究热点, 国内外学者也对气候变化下水资源脆弱性进行了研究。Vorosmarty 等人使用用水量和水资源量之比来构造水资源压力指数, 用以表征水资源脆弱性, 以  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  网格评价了 1985~2025 年全球范围内受气候变化和人口增长驱动的水资源脆弱性, 并使用 GCMs 气候模型和水量平衡模型设定, 用情景分析方法评价了未来情景下全球水资源脆弱性的变化情况<sup>[29]</sup>。Kathleen A. Farley 等人耦合自然 - 社会系统, 探讨了气候变化对俄勒冈山脉地区水资源脆弱性的影响, 具体探讨了气候变化引起的敏感性与用水部门的适应性, 从用户和政策角度提出了相应对策<sup>[30]</sup>; Zhou Jing-bo 等人从 IPCC 提出的脆弱性概念出发, 探讨了中国城市在气候变化下面临的水资源脆弱性<sup>[31]</sup>, Ulka Kelkar 等人分析了印度 Uttarakhand 地区的气候变化和水资源压力的适应性和

脆弱性<sup>[32]</sup>, 邓慧平等人分析了气候变化对山东省莱州湾地区水资源脆弱性的影响<sup>[33]</sup>, 唐国平等人探讨了气候变化的水资源脆弱性及其评估方法<sup>[34]</sup>。最近夏军等人, 针对中国东部季风区水资源供需矛盾的水资源脆弱性问题, 发展了将气候变化对水资源影响的敏感性和抗压性耦合以及与适应性对策与调控联系的水资源脆弱性理论与方法研究, 取得了一些新的进展<sup>[20]</sup>。

### 3. 水资源脆弱性概念与内涵

水资源脆弱性(Vulnerability)是指气候变化对水资源系统造成不利影响的程度。上个世纪 90 年代水资源脆弱性多研究地下水问题, 如 1993 年美国国家科学研究委员会提出了地下水脆弱性<sup>[35]</sup>。由于水资源问题的复杂性和地域的分异规律, 由于研究对象和问题的差异, 对其内涵的理解湖解释也各不相同<sup>[13,19,20,22,25,27,29,30,32,34]</sup>。

我们通过研究和分析, 认为比较具有代表性的是 IPCC 提出的脆弱性定义。IPCC 在 2001 年第 4 次评估报告中所提出的定义“脆弱性是指系统容易遭受和有没有能力对付气候变化(包括气候变率和极端气候事件)的不利影响的程度。它是系统对所受到的气候变化的特征、幅度和变化速率及其敏感性、适应能力的函数”。IPCC 在 2011 年 11 月发表的《管理极端事件和灾害风险, 推进气候变化适应》特别报告(简称 SREX)将脆弱性与暴露度结合起来, 认为脆弱性是指人员、生计、环境服务和各种资源、基础设施, 以及经济、社会或文化资产处在有可能受到不利影响的倾向或趋势<sup>[36,37]</sup>。

综合以上研究成果, 本文认为水资源脆弱性是受到气候变化、极端事件、人类活动等因素的影响, 水资源系统正常的结构和功能受到损坏并难以恢复到原有状态的倾向或趋势。水资源脆弱性的内涵包括以下内容:

- 1) 水资源脆弱性是水资源系统的内在属性, 其内部结构和特征是脆弱性的决定性因素;
- 2) 水资源脆弱性包括水资源系统对外来影响(尤其是不利影响)的敏感性和适应性;
- 3) 从影响因素来看, 水资源脆弱性可分为自然环境脆弱性和社会经济脆弱性两方面;
- 4) 各种影响因素对不同尺度、空间分布的水资源

系统的影响程度不同, 使水资源脆弱性表现出尺度和空间分布的特征。

### 4. 评价方法

水资源脆弱性的评价大致可分为定性评价和定量评价两种。定性评价是对影响水资源系统的因素进行定性分析, 找到主要影响因素, 从而提出降低水资源脆弱性的措施。Ulka Kelkar 等人<sup>[32]</sup>、吴青等人<sup>[15]</sup>、黄友波等人<sup>[14]</sup>的研究成果就是典型的水资源脆弱性定性评价。在水资源脆弱性评价中, 使用最多的还是定量评价。水资源脆弱性的定量评价方法大致可分为指标法和函数法。从已有的研究来看, 多数研究采用指标法进行水资源脆弱性评价, 此方法一般先建立水资源脆弱性指标体系, 对指标赋予权重, 再使用加权方法得到水资源脆弱性评价结果<sup>[3,11,31,38,39]</sup>。有些研究在指标法的基础上引入分形理论<sup>[13]</sup>、模糊数学方法<sup>[23,25,27]</sup>、层次分析法<sup>[24,26]</sup>、驱动-压力-状态-影响-响应模型<sup>[40]</sup>等方法或模型, 主要用于指标权重确定。指标法具有体系清晰、构建灵活、考虑全面、易于操作等优点, 但同时也有缺乏系统性、指标间作用机制不明、区域性明显、结果难以比较、不易与气候变化相联系等缺点。有的学者从水资源脆弱性的概念出发, 使用函数法进行水资源脆弱评价<sup>[20,29,34,41]</sup>。与指标法比较, 函数法具有系统性, 物理机制明晰, 适用范围广, 易于在地区间比较, 受尺度转换影响较小, 能与气候变化相联系, 同时易于操作。但函数法也有指标选取困难、不够灵活、对数学水平要求较高、因素难以考虑全面等缺点。

本文采用水资源脆弱性评价的指标体系法, 开展气候变化背景下流域或区域水资源脆弱性评价。

该方法的主要步骤有: 1) 选取指标, 构建评价指标体系; 2) 对数据进行标准化; 3) 确定各指标权重; 4) 使用加权方法计算水资源脆弱性指数。

#### 4.1. 指标体系构建

评价指标体系的构建是水资源脆弱性评价的关键步骤, 需要遵循以下构建原则: 1) 科学性原则: 指标体系应具有明确的科学涵义, 能客观真实准确地反映水资源系统的特征, 能较好地度量水资源脆弱性; 2) 完备性: 指标体系应具有较好的覆盖度, 能较全面

地反映水资源脆弱性; 3) 主导性: 应选取对水资源脆弱性起主导作用的指标, 适当减少指标数量; 4) 独立性: 指标之间在概念、数量关系上应尽量互相独立; 5) 可操作性: 指标数据应易于获取且受多数学者承认; 6) 区域性: 指标应充分考虑评价区域的水资源系统特征和社会经济情况。

根据以上构建原则, 本研究选取多年平均降水量、年降水量变差系数、多年平均降水量变化率、当年供需比、近5年供需比变化率、万元GDP用水量、人均GDP、三类以上河长比例等8个指标进行水资源脆弱性评价, 并将这些指标分为自然环境脆弱性和社会经济脆弱性两类。指标体系框图见图1。多年平均降水量和年降水量变差系数选用1956~2000时段; 多年平均降水量变化率是2001~2000时段与1956~2000时段的多年平均降水量的变化率; 当年供需比是评价年份供水量与水资源量之比; 近5年供需比变化率是至评价年份止的近5年的供需比变化率, 万元GDP用水量和人均GDP使用评价年份当年值; 三类以上河长比例是评价年份当年区域内水质在三类以上的河长占全部评价河长的比例。

### 4.2. 数据标准化

由于所选取的指标具有不同的量纲, 在评价之前应进行标准化。根据本研究的实际情况, 本文选取极差标准方法对各指标对应的数据进行标准化。

在8个指标中, 年降水量变差系数、当年供需比、近5年供需比变化率、万元GDP用水量等4个指标为正向指标, 使用公式进行标准化; 多年平均降水量、

多年平均降水量变化率、人均GDP、三类水以上河长比例等4个指标为负向指标, 使用公式进行标准化。

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \quad (1)$$

$$x'_{ij} = \frac{\max\{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$$

在公式和中,  $x'_{ij}$  是标准化后的数值,  $x_{ij}$  为标准化前的数值,  $\max\{x_{ij}\}$  为  $x_{ij}$  中最大值,  $\min\{x_{ij}\}$  为  $x_{ij}$  中最小值。

### 4.3. 权重确定

本文采用层次分析法确定各指标权重。限于篇幅, 层次分析法的具体步骤介绍见文献<sup>[6]</sup>。指标权重的层次分析法使用Satty的9级标度法进行评分, 经专家咨询确定两两指标之间的相对重要性, 权重计算结果见表1。

### 4.4. 水资源脆弱性评价

最终的水资源脆弱性脆弱性指数(WVI, Water Vulnerability Index)采用综合指数加权求和方法计算, 见公式。

$$WVI_i = \sum_{j=1}^m x'_{ij} w_{ij} \quad (3)$$

公式中,  $WVI_i$  为第  $i$  个评价单元的水资源脆弱性指数,  $x'_{ij}$  是标准化后的指标数值,  $w_{ij}$  是该指标数值对应的权重。水资源脆弱性指数越大, 表明该评价单元的水资源脆弱性程度越高, 反之则越低。水资源脆弱性指数取值范围为(0,1)。

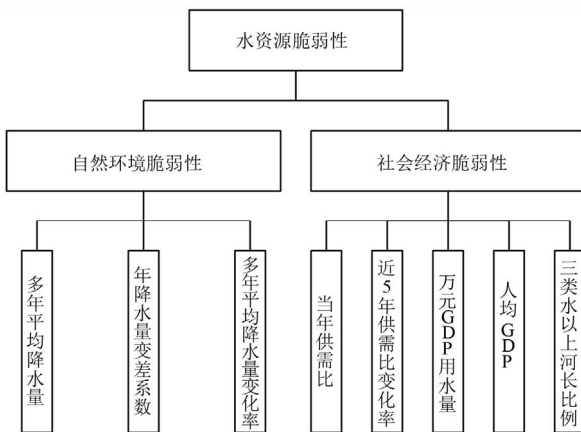


Figure 1. Framework of water vulnerability assessment  
图1. 水资源脆弱性评价指标体系

Table 1. Weights of the assessment indices  
表1. 评价指标权重

指标	权重
多年平均降水量	0.083
年降水量变差系数	0.083
多年平均降水量变化率	0.083
当年供需比	0.452
近5年供需比变化率	0.062
万元GDP用水量	0.044
人均GDP	0.035
三类水以上河长比例	0.158

## 5. 实例研究

### 5.1. 研究区概况

本文选取中国为研究区。中国位于亚欧大陆东岸, 东南濒临太平洋, 西北深入亚洲腹地, 位于东经 73°~135°、北纬 4°~53°。中国水资源总量较多, 但人均水资源量仅为 2300 m<sup>3</sup>/人, 按国际通用的 Falkenmark 指数, 处于轻度缺水状态<sup>[41]</sup>, 只有世界平均水平的四分之一。中国水资源空间分布极不均匀, 表现为东南向西北递减。随着社会经济的发展和人口增加, 越来越多的地区受到水资源短缺、水污染的困扰。气候变化引起的干湿变化和极端事件更加剧了中国水资源系统的脆弱性。面对严峻的水资源形势, 中国政府通过实施水资源开发利用、用水效率、水功能区限制纳污在内的“三条红线”推行最严格水资源管理来积极应对水危机, 通过提高适应能力降低水资源脆弱性。

本文以 2010 年为评价年份, 以除台港澳外的 31 个省省级行政区作为评价单元。评价所用数据中, 多年平均降水量、年降水量变差系数、多年平均降水量变化率来源于气象部门提供的数据和《中国水资源公报》, 其余数据来自《中国水资源公报》。

### 5.2. 评价结果

将有关数据使用以上所述评价方法, 即可得到 2010 年中国水资源脆弱性评价结果。根据评价结果和

有关水资源评价结果, 可将 WVI 分为 5 个级别, 见表 2。

根据表 2 的分级, 可以绘制出 2010 年中国水资源脆弱性分布图, 见图 2。

从图 2 的评价结果可以看出, 南方地区整体脆弱性较低, 北方地区整体脆弱性较高。水资源极脆弱区包括北京、天津、河北、山西、江苏、上海、宁夏, 这些地区的水资源脆弱性指数都在 0.4 以上, 其中宁夏的水资源脆弱性最高, 为 0.92, 其次为天津 0.56 和上海 0.48, 北京、河北、山西、江苏的脆弱性在 0.41~0.43 之间。水资源强脆弱区全部分布在北方, 包括黑龙江、内蒙古、山东、河南、甘肃、新疆。水资源中脆弱区包括吉林、陕西、安徽、贵州, 分布比较分散。水资源弱脆弱区主要分布在南方, 包括浙江、湖北、湖南、广东、广西、云南、西藏和青海。水资源不脆弱区包括江西、福建、海南、四川、重庆, 水资源脆弱性最低的为海南 0.13, 其次为四川 0.14, 福建、江西、重庆的脆弱性都接近 0.2。

Table 2. Classification of water vulnerability index  
表 2. 水资源脆弱性指数分级

脆弱性指数区间	分级
$0 \leq WVI < 0.2$	不脆弱
$0.2 \leq WVI < 0.25$	弱脆弱
$0.25 \leq WVI < 0.3$	中脆弱
$0.3 \leq WVI < 0.4$	强脆弱
$0.4 \leq WVI \leq 1$	极脆弱

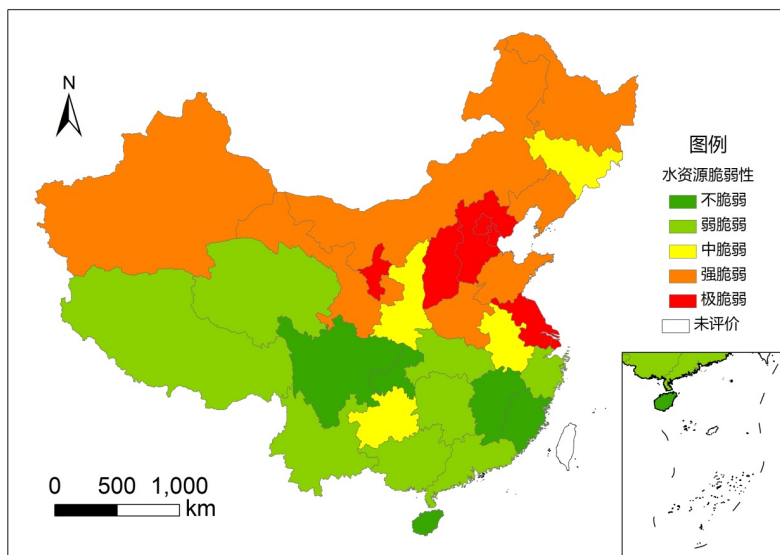


Figure 2. Water vulnerability of China in 2010  
图 2. 2010 年中国水资源脆弱性



水资源脆弱性是多种因素对水资源系统影响的综合表现。相同或相近的水资源脆弱性评价结果,可能是不同原因造成的,其反映的水资源问题也不一样。表3列出了部分省市水资源脆弱性各评价指标的加权值,即标准化后的指标值与对应权重之积。同为弱脆弱地区的浙江、湖南、青海,水资源脆弱性指数值均为0.21。浙江的三类水以上河长比例、多年平均降水量变化率的脆弱程度较高,反映出其水污染问题较为突出,且气候变化引起了水资源减少的结果。湖南的多年平均降水量变化率、近5年供需比变化率、人均GDP和三类水以上河长比例的脆弱程度较高,反映出气候变化引起当地水资源减少、社会经济发展使用水增加、经济尚不发达而使适应能力受限、水污染问题较显著的问题。青海的多年平均降水量的脆弱性最高,突出反映其处于西部干旱半干旱地区的自然地理特征,由于其他方面的脆弱程度较低,使其整体脆弱性较低,仍处于弱脆弱地区。另外,同为强脆弱地区的北京、江苏、河北,水资源脆弱性指数均为0.41。北京的多年平均降水量、年降水量变差系数、多年平均降水量变化率、当年供需比的脆弱性较高,说明北

京本地水资源并不丰富,在气候变化下来水减少、变率增加,而且水资源开发利用程度较高;万元GDP用水量和人均GDP的脆弱程度较低,说明北京在水资源利用效率上做得很好,经济发达使其具有较强的适应能力。江苏的当年供需比、近5年供需比变化率、三类水以上河长比例的脆弱程度最高,说明江苏近年来用水有明显增加,水资源开发利用程度较高,特别是水污染问题十分突出。河北的多年平均降水量、年降水量变差系数、多年平均降水量变化率、当年供需比、近5年供需比变化率、三类以上河长比例的脆弱程度都较高,说明河北水资源短缺问题比较严重,近年水资源量有明显下降,社会经济发展带来的用水增加与水资源开发利用程度较高使缺水程度加剧,同时河北的水污染问题也较为严重。

将多年平均降水量、年降水量变差系数、多年平均降水量变化率加权值之和作为自然环境脆弱性指数,将其余指标的加权值之和作为社会经济脆弱性指数,则二者之和即为水资源脆弱性指数。按水资源脆弱性指数从小到大排列,见图3。从中可以看出,随着水资源脆弱性指数的增加,自然环境脆弱性指数和

Table 3. Result of water vulnerability assessment of several provinces  
表3. 部分省级行政区水资源脆弱性评价结果

省级行政区	多年平均降水量	年降水量变差系数	多年平均降水量变化率	当年供需比	近5年供需比变化率	万元GDP用水量	人均GDP	三类水以上河长比例	WVI
浙江	0.01	0.03	0.05	0.01	0.02	0.00	0.01	0.08	0.21
湖南	0.02	0.01	0.05	0.01	0.04	0.01	0.03	0.04	0.21
青海	0.08	0.02	0.03	0.00	0.03	0.01	0.03	0.02	0.21
北京	0.06	0.08	0.08	0.09	0.05	0.00	0.00	0.04	0.41
江苏	0.04	0.04	0.05	0.08	0.06	0.00	0.01	0.12	0.41
河北	0.06	0.05	0.07	0.08	0.03	0.00	0.03	0.09	0.41

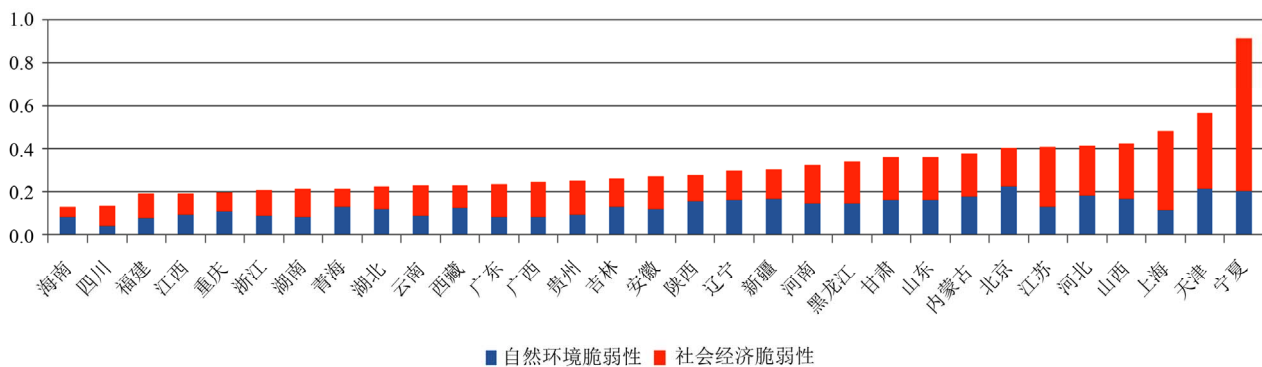


Figure 3. Construction of water vulnerability index of provinces  
图3. 省级行政区水资源脆弱性构成

社会经济脆弱性指数在数量上都有增加的趋势, 而社会经济脆弱性指数的增加量要明显高于自然环境脆弱性指数的增加量, 从而使而社会经济脆弱性指数所占比例迅速增加, 自然环境脆弱性指数所占比例即随之减少。这说明随着水资源脆弱性的增加, 社会经济因素对水资源系统的影响逐渐起主导作用, 而自然环境因素影响也有所增加。水资源脆弱性高的地区的人类活动对水资源系统的干扰、破坏程度要远大于水资源脆弱性较低的地区, 同时自然环境因素导致的水资源减少、变率增加更加加剧了这些地区的水资源危机。

### 5.3. 适应性对策

水资源脆弱性评价的目的在于根据评价结果发现区域水资源系统存在的问题和面临的威胁, 从而有根据地制定相应的适应性对策, 提高区域的适应能力, 降低水资源系统的脆弱性。

根据以上水资源脆弱性评价结果和分析, 为减少中国水资源脆弱性, 实现水资源可持续利用, 本研究在此提出以下适应性对策。

1) 提升应对气候变化的适应能力。针对未来气候变化带来的水资源变化情况, 加强水利等基础设施建设, 建立完善的气象监测与灾害预警系统, 建设防洪重点工程和重点水源工程, 提高水旱灾害的应对能力, 满足未来水资源变化情况下的水资源需求。

2) 提高水资源利用效率, 建设节水型社会。在农业上, 应大力开展农田水利基本建设, 扩大节水灌溉面积, 调整种植结构, 选择节水作物, 提高农业用水效率。在工业上, 应推进产业结构调整 and 产业升级, 淘汰落后工业, 推广节水工艺, 提高工业用水重复利用率和非常规水源利用比例。在生活上, 应大力推广节水器具、节水设施的使用, 提高公众节水意识, 推广应用非常规水源。推进水利现代化建设, 将先进的理念和技术手段应用在水资源管理部门的管理实践中, 提高水资源管理水平, 实现水资源优化配置, 在全局提高全社会的用水效率。

3) 对水资源开发利用实施总量控制。严格控制区域用水总量, 实行水资源有偿利用和取水许可, 强化区域内水资源统一配置和调度。在北方缺水地区, 应逐渐控制对地表水的过度开发和地下水超采, 逐步恢

复河道生态功能和正常的地下水位。

4) 积极开发新水源。积极推进雨洪利用工程建设, 在农业上建设小水库、塘坝等雨水利用工程, 提高农业用水保证率; 在城市中建设雨水利用工程, 提高城市防洪能力, 同时解决绿化、河道补水等的水源问题。开发利用再生水资源, 在增加城市供水的同时减少排污。沿海城市可开展海水淡化, 用于工业用水和部分生活用水。

5) 控制入河湖排污总量, 治理水污染。加强水功能区管理, 严格控制工业、生活污染源, 加强主要污染物减排工作, 提高城市污水处理率, 治理农业面源污染, 减少入河湖的污染物总量。对已经发生水污染的地区, 应采取积极措施治理污染, 恢复河湖生态功能。

## 6. 结论

水资源脆弱性研究是评价水资源系统受气候变化和人类活动影响的重要方法, 也是发现水资源问题、提出适应性对策的重要依据。本文首先总结了水资源脆弱性评价的发展历程, 在此基础上提出水资源脆弱性是受到气候变化、极端事件、人类活动等因素的影响, 水资源系统正常的结构和功能受到损坏并难以恢复到原有状态的倾向或趋势。本文将水资源脆弱性分为自然环境脆弱性和社会经济脆弱性两方面, 以此为基础选取多年平均降水量、年降水量变差系数、多年平均降水量变化率、当年供需比、近5年供需比变化率、万元GDP用水量、人均GDP、三类以上河长比例等8个指标建立指标体系, 使用德尔菲法与层次分析法结合确定指标权重, 以中国省级行政区为评价单元对中国进行了水资源脆弱性评价。

评价结果表明: 1) 水资源脆弱性在南方地区较低, 在北方地区较高, 其中宁夏水资源脆弱性最高, 海南最低; 2) 水资源脆弱性是多种因素对水资源系统影响的综合表现。相同或相近的水资源脆弱性评价结果, 可能是不同原因造成的; 3) 随着水资源脆弱性的增加, 社会经济因素对水资源系统的影响逐渐起主导作用, 而自然环境因素影响也有所增加。水资源脆弱性高的地区的人类活动对水资源系统的干扰、破坏程度要远大于水资源脆弱性较低的地区, 同时自然环境因素导致的水资源减少、变率增加更加加剧了这些地

区的水资源危机。

根据评价结果, 本研究提出了相应的适应性对策: 提升应对气候变化的适应能力; 提高水资源利用效率, 建设节水型社会; 对水资源开发利用实施总量控制; 积极开发新水源; 控制入河湖排污总量, 治理水污染。

由于未来气候变化和人类活动对水资源系统的影响存在诸多不确定性, 本研究暂未讨论未来气候变化和人类活动情景下的中国水资源脆弱性。考虑气候变化情景的指标体系应在本文基础上有所改进和发展。这些问题都有待今后进一步研究讨论。

## 参考文献 (References)

- [1] ALBINET, M., MARGAT, J. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. *Bull BRGM*, 2ème Série, 1970, 3(4): 13-22.
- [2] ALBINET, M., MARGAT, J. Groundwater pollution vulnerability mapping. *Bulletin du Bureau de Recherches Géologiques et Minières Bull BRGM 2nd Series*, 1970, 3(4): 13-22.
- [3] MIRAUDA, D., OSTOICH, M. Surface water vulnerability assessment applying the integrity model as a decision support system for quality improvement. *Environmental Impact Assessment Review*, 2011, 31(3): 161-171.
- [4] 王明泉, 张济世, 程中山. 黑河流域水资源脆弱性评价及可持续发展研究[J]. *水利科技与经济*, 2007, 13(2): 114-116. WANG Mingquan, ZHANG Jishi and CHENG Zhongshan. The water resources fragility estimate of Heihe river basin and sustainable development research. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2007, 13(2): 114-116. (in Chinese)
- [5] 刘硕, 冯美丽. 基于 GIS 技术分析水资源脆弱性[J]. *太原理工大学学报*, 2012, 43(1): 77-82. LIU Shuo, FENG Meili. Study on the evaluation for water resource vulnerability in Yangqu County based on remote sensing and GIS technology. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2012, 43(1): 77-82. (in Chinese)
- [6] 张明月, 彭定志, 钱鞠. 疏勒河流域昌马灌区水资源脆弱性分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2012, 10(2): 104-106, 128. ZHANG Mingyue, PENG Dingzhi and QIAN Ju. Analysis of water resources vulnerability in the Changma irrigation area of Shule river basin. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2012, 10(2): 104-106, 128. (in Chinese)
- [7] DOERFLIGER, N., JEANNIN, P. Y. and ZWAHLEN, F. Water vulnerability assessment in karst environments: A new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental Geology*, 1999, 39(2): 165-176.
- [8] DIXON, B. Groundwater vulnerability mapping: A GIS and fuzzy rule based integrated tool. *Applied Geography*, 2005, 25(4): 327-347.
- [9] BROUWER, F., FALKENMARK, M. Climate-induced water availability changes in Europe. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1989, 13(1): 75-98.
- [10] FENG, Y., HE, D. M. Transboundary water vulnerability and its drivers in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(2): 189-199.
- [11] ALESSA, L., KLISKEY, A., BUSEY, R., et al. Freshwater vulnerabilities and resilience on the Seward Peninsula: Integrating multiple dimensions of landscape change. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 2008, 18(2): 256-270.
- [12] HAMOUDA, M. A., EL-DIN, M. M. N. and MOURSRY, F. I. Vulnerability assessment of water resources systems in the eastern Nile basin. *Water Resources Management*, 2009, 23(13): 2697-2725.
- [13] 陈康宁, 董增川, 崔志清. 基于分形理论的区域水资源系统脆弱性评价[J]. *水资源保护*, 2008, 24(3): 24-26, 34. CHEN Kangning, DONG Zengchuan and CUI Zhiqing. Evaluation of vulnerability of regional water resources system based on the fractal theory. *Water Resources*, 2008, 24(3): 24-26, 34. (in Chinese)
- [14] 黄友波, 郑冬燕, 夏军, 等. 黑河地区水资源脆弱性及其生态问题分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2004, 15(1): 32-37. HAUNG Youbo, ZHEN Dongyan, XIA Jun, et al. Analysis of water resources vulnerability and ecological problems in Heihe river basin. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2004, 15(1): 32-37. (in Chinese)
- [15] 吴青, 周艳丽. 黄河河源区生态环境变化及水资源脆弱性分析[J]. *水资源保护*, 2002, 4: 21-24. WU Qing, ZHOU Yanli. Eco-environmental change and water resources vulnerability analysis of headwaters of Huanhe River. *Water Resources Protection*, 2002, 4: 21-24. (in Chinese)
- [16] 白庆芹, 汪妮, 解建仓, 等. 基于模糊综合评价法的城市河流脆弱性研究[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(1): 244-247, 256. BAI Qingqin, WANG Ni, XIE Jiancang, et al. A study on vulnerability of urban rivers based on fuzzy comprehensive evaluation. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(1): 244-247, 256. (in Chinese)
- [17] 郝璐, 王静爱. 基于 SWAT-WEAP 联合模型的西辽河流域水资源脆弱性研究[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(3): 468-479. HAO Lu, WANG Jing'ai. Evaluate to water resources vulnerability using SWAT-WEAP model in tributary of Xiliaohe river. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(3): 468-479. (in Chinese)
- [18] 刘海娇, 仕玉治, 范明元, 等. 基于 GIS 的黄河三角洲水资源脆弱性评价[J]. *水资源保护*, 2012, 28(1): 34-37. LIU Haijiao, SHI Yuzhi, FAN Mingyuan, et al. Water resources vulnerability assessment in Yellow River Delta based on GIS. *Water Resources Protection*, 2012, 28(1): 34-37. (in Chinese)
- [19] 吕彩霞, 仇亚琴, 贾仰文, 等. 海河流域水资源脆弱性及其评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2012, 10(1): 55-59. LV Caixia, CHOU Yaqin, JIA Yangwen, et al. Water resources vulnerability and its assessment of Haihe river basin. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2012, 10(1): 55-59. (in Chinese)
- [20] 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. XIA Jun, QIU Bing, PAN Xingyao, et al. Assessment of water resources vulnerability under climate change and human activities. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(4): 443-451. (in Chinese)
- [21] 邹君, 傅双同, 毛德华. 中国南方湿润区水资源脆弱度评价及其管理——以湖南省衡阳市为例[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(2): 76-80. ZOU Jun, FU Shuangtong and MAO Dehua. Assessment and management of water resource vulnerability in Hengyang City. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(2): 76-80. (in Chinese)
- [22] 邹君, 刘兰芳, 田亚平. 地表水资源的脆弱性及其评价初探[J]. *资源科学*, 2007, 29(1): 92-97. ZOU Jun, LIU Lanfang and TIAN Yaping. Concept and quantitative assessment of vulnerability of surface water resource. *Resources Science*, 2007, 29(1): 92-97. (in Chinese)
- [23] 邹君, 王亚力, 毛德华. 南方丘陵区生态水资源脆弱度评价——以湖南省为例[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3543-3552. ZOU Jun, WANG Yali and MAO Dehua. Assessment of vulnerability of ecological water resource bank in hilly land regions, South China: A case study of Hunan Province. *Acta Ecologica*



- Sinica, 2008, 28(8): 3543-3552. (in Chinese)
- [24] 邹君, 谢小立. 亚热带丘岗区地表水资源脆弱性评估及其管理——以衡阳盆地为例[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(3): 303-307.  
ZOU Jun, XIE Xiaoli. Quantitative assessment of vulnerability and management of surface water resource in subtropical hilly area—A case study in Hengyang basin of Hunan province. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, 16(3): 303-307. (in Chinese)
- [25] 邹君, 杨玉蓉, 田亚平, 等. 南方丘陵区农业水资源脆弱性概念与评价[J]. 自然资源学报, 2007, 22(2): 302-310.  
ZOU Jun, YANG Yurong, TIAN Yaping, et al. Concept and assessment on vulnerability of agricultural water resource in hilly area of southern China. Journal of Natural Resources, 2007, 22(2): 302-310. (in Chinese)
- [26] 张笑天, 陈崇德. 漳水水库灌区水资源脆弱性评价研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2010, 31(2): 12-15.  
ZHANG Tianxiao, CHEN Chongde. Evaluation of vulnerability of water resources in the Zhanghe irrigation district. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2010, 31(2): 12-15. (in Chinese)
- [27] 冯少辉, 李靖, 朱振峰, 等. 云南省滇中地区水资源脆弱性评价[J]. 水资源保护, 2010, 26(1): 13-16.  
FENG Shaohui, LI Jing, ZHU Zhenfeng, et al. Study on water resources vulnerability assessment in central Yunnan. Water Resources Protection, 2010, 26(1): 13-16. (in Chinese)
- [28] 段顺琼, 王静, 冯少辉, 等. 云南高原湖泊地区水资源脆弱性评价研究[J]. 中国农村水利水电, 2011, 9: 55-59.  
DUAN Shunqiong, WANG Jing, FENG Shaohui, et al. Research on the assessment of water resources vulnerability of lakes in Yunnan plateau. China Rural Water and Hydropower, 2011, 9: 55-59. (in Chinese)
- [29] VOROSMARTY, C. J., GREEN, P., SALISBURY, J., et al. Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. Science, 2000, 289(5477): 284-288.
- [30] FARLEY, K. A., TAGUE, C. and GRANT, G. E. Vulnerability of water supply from the Oregon Cascades to changing climate: Linking science to users and policy. Global Environmental Change, 2011, 21(1): 110-122.
- [31] ZHOU, J. B., ZOU, J. Vulnerability assessment of water resources to climate change in Chinese cities. Ecological Economy, 2010, 6(2): 106-114.
- [32] KELKAR, U., NARULA, K. K., SHARMA, V. P., et al. Vulnerability and adaptation to climate variability and water stress in Uttarakhand State, India. Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions, 2008, 18(4): 564-574.
- [33] 邓慧平, 赵明华. 气候变化对莱州湾地区水资源脆弱性的影响[J]. 自然资源学报, 2001, 16(1): 9-15.  
DENG Huiping, ZHAO Minghua. Impact of climate change on water resource vulnerability in Laizhou bay region. Journal of Natural Resources, 2001, 16(1): 9-15. (in Chinese)
- [34] 唐国平, 李秀彬, 刘燕华. 全球气候变化下水资源脆弱性及其评估方法[J]. 地球科学进展, 2000, 15(3): 313-317.  
TANG Guoping, LI Xiubin and LIU Yanhua. Assessment method of vulnerability of water resources under global climate change. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(3): 313-317. (in Chinese)
- [35] Commission on Geosciences, Environment and Resources. Ground water vulnerability assessment—predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty. Washington DC: National Academy Press, 1993.
- [36] 郑菲, 孙诚, 李建平. 从气候变化的新视角理解灾害风险、暴露度、脆弱性和恢复力[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(2): 79-83.  
ZHENG Fei, SUN Cheng and LI Jianping. Climate change: New dimensions in disaster risk, exposure, vulnerability, and resilience. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis, 2012, 8(2): 79-83. (in Chinese)
- [37] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: A special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [38] SULLIVAN, C. A. Quantifying water vulnerability: A multi-dimensional approach. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2010, 25(4): 627-640.
- [39] 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 Lvliu. Concept and quantitative assessment of vulnerability of water resource. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 22(2): 41-44. (in Chinese)
- [40] 董四方, 董增川, 陈康宁. 基于 DPSIR 概念模型的水资源系统脆弱性分析[J]. 水资源保护, 2010, 26(4): 1-3, 25.  
DONG Sifang, DONG Zengchuan and CHEN Kangning. Analysis of water resources system vulnerability based on DPSIR conceptual model. Water Resources Protection, 2010, 26(4): 1-3, 25. (in Chinese)
- [41] PERVEEN, S., JAMES, L. A. Scale invariance of water stress and scarcity indicators facilitating cross-scale comparisons of water resources vulnerability. Applied Geography, 2011, 31(1): 321-328.