

The Theories and Assessment of Vulnerability of Water Resource in Haihe River Basin*

Yang Kuang, Jun Xia, Liping Zhang, Zhen Yang

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan
Email: kuangyang@whu.edu.cn

Received: May 28th, 2012; revised: Jun. 16th, 2012; accepted: Jun. 26th, 2012

Abstract: This paper explains the concept of water resources vulnerability. Research on the vulnerability assessment of water resources at home and abroad has been reviewed, including the establishment of an index system, determination of weight coefficients and selection of the method of comprehensive assessment. Finally, an assessment index system of nine indicators is built based on Haihe River Basin, and the principal component analysis method is applied in 8 provinces of the basin from 1998-2008. A comprehensive evaluation and comparison in the whole country is also given. The result suggests that the water resources of Haihe River Basin is more vulnerable, which is consistent with the practical cases. Take the year 1998 as an example, the impact on water vulnerability of the main components is shown in water system, social system and so on. Above all, the assessment result is satisfying, which can provide reference for the reasonable planning and use of the water resources in Haihe River Basin.

Keywords: Water Resource; Vulnerability Assessment; Principal Component Analysis; Haihe River Basin

海河流域水资源脆弱性理论及评价*

匡洋, 夏军, 张利平, 杨珍

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉
Email: kuangyang@whu.edu.cn

收稿日期: 2012年5月28日; 修回日期: 2012年6月16日; 录用日期: 2012年6月26日

摘要: 阐述水资源脆弱性的概念, 总结国内外水资源脆弱性研究进展及水资源脆弱性评价的内容, 包括指标体系的构建、权重系数的确定、以及综合评价方法的选取。以海河流域为研究区域, 构建了水资源脆弱性的评价指标体系, 采用主成分分析法, 对海河流域 1998 年~2008 年 8 个省(市)及全国的水资源脆弱性进行了综合评价和比较。并以 1998 年为例, 从水资源系统、社会系统等方面分析了各主要因子对水资源脆弱性的影响。本文的综合评价结果能够为海河流域水资源的合理规划和利用提供一定的科学依据。

关键词: 水资源; 脆弱性; 主成分分析法; 海河流域

1. 引言

自 20 世纪以来, 人口的不断增长和经济的飞速

发展, 导致水资源脆弱性不断加剧。水资源供需不平衡, 洪水干旱灾害频发, 地下水过度开采等日益突出的水资源问题越来越受到重视。随着全球气候变化对水资源的影响越来越受到关注, 关于气候变化下水资源脆弱性的研究也越来越多。探讨气候变化影响下的

*基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2010CB428406、2012CB956204)。

作者简介: 匡洋(1988-), 女, 硕士研究生。

水资源脆弱性理论及评价, 可以分析气候变化下水资源对经济社会的响应规律, 提出相应的水资源管理对策, 从而提高应对未来气候变化的水资源安全保障能力^[1], 为合理地利用和规划水资源提供了科学依据, 也有利于水资源和社会的可持续发展。

我国气候南北东西差异较大, 水系分布不均, 人口压力大, 经济发展快速, 由此产生的与水资源相关的生态环境问题, 严重制约了水资源和经济社会的可持续发展。海河流域多年平均水资源总量 419 亿立方米, 仅占全国的 1.5%; 人均水资源占有量约 350 立方米, 不足全国的 1/6, 为世界平均水平的 1/24, 远低于国际公认的人均 1000 立方米的水资源紧缺标准; 耕地亩均水资源量 258 立方米, 仅为全国的 1/8。海河流域以仅占全国 1.5% 的有限水资源, 却承担着 11% 的耕地面积和 10% 的人口以及京、津等十几座城市的供水任务^[2]。海河流域是处于供需严重失衡状态的, 水资源脆弱性在全国各大流域中尤为突出。本文在总结前人研究的基础上, 采用主成分分析法, 对海河流域 1998 年~2008 年 8 个省(市)及全国的水资源脆弱性进行了综合评价和比较。

2. 水资源脆弱性研究进展

1968 年由法国的 Albinet 和 Marget 首次提出地下水的脆弱性概念^[3]。20 世纪 90 年代, Kenneth Hewitt^[4]将脆弱性研究和“调整”的思想扩展到自然、技术、人为灾害的各个领域和减轻灾害各个环节。1993 年美国国家科学研究委员会^[5]给出如下定义: 地下水脆弱性是污染物到达最上层含水层之上某特定位置的倾向性与可能性。国外关于地下水脆弱性的评价方法很多, 如迭置指数法、过程数学模拟法、统计方法和模糊数学方法^[6], 其中以迭置指数法应用最多。IPCC 在第二次评估报告中, 进一步将脆弱性与气候变化联系起来, 开展气候变化下水资源脆弱性研究成为热点。近年来, 国外多结合 GIS 等高新技术进行脆弱性评价及脆弱性制图。如 2008 年 Rahman^[7]采用基于 GIS 的 DRASTIC 模型对印度阿里格里地区潜水层脆弱性进行了评价。2010 年杨国民等^[8]利用 DRASTIC 方法并结合 GIS 技术对阜新盆地进行了地下水脆弱性评价。

我国水资源脆弱性研究始于 20 世纪 90 年代中

期。在国外研究的基础上, 研究者们提出了水资源脆弱性理论及评价方法, 各有侧重。如 1997 年郑西来^[9]对西安市潜水污染的潜在性进行分析和评价, 涉及到地下水特殊脆弱性评价。2000 年唐国平等^[10]将气候变化下水资源脆弱性分为水文系统的脆弱性、水利系统及其设计的脆弱性、自然地理环境社会的脆弱性三类, 提出了 23 个指标, 用于全球气候变化下水资源脆弱性评估。2002 年刘绿柳^[11]提出的水资源脆弱性概念中将水资源的脆弱度分为本质脆弱度和特殊脆弱度两部分, 选择了 17 个指标建立了评价指标体系, 并且给出了定量评价方法。2007 年邹君等^[12]认为地表水资源脆弱性包括水质和水量 2 个方面, 并分为自然脆弱性、人为脆弱性和承载脆弱性三类, 选取了 19 个指标, 构建了一个地表水资源系统脆弱性评价指标体系, 并给出了地表水资源脆弱性的评价方法。2010 年董四方等^[13]基于 DPSIR 概念模型的水资源脆弱性分析, 建立了由动力指标、压力指标、状态指标、影响指标和响应指标 5 类, 一共 36 个评价因子组成的脆弱性指标体系。

总的来说, 国内对地下水资源脆弱性研究多于地表水资源脆弱性研究, 对水质脆弱性研究多于水量脆弱性研究, 对北方干旱和半干旱地区水资源脆弱性研究多于南方湿润地区水资源脆弱性研究^[14], 区域水资源及地表水资源脆弱性研究仍处于起步阶段^[15]。

3. 水资源脆弱性概念及评价方法

3.1. 水资源脆弱性概念

脆弱和脆弱性是用来描述相关系统及其组成要素易于受到影响和破坏, 并缺乏抗拒干扰、恢复初始状态(自身结构和功能)的能力^[16]。对于水资源系统, 可以引入脆弱性概念, 把水资源脆弱性理解为: 水资源系统易于遭受人类活动、自然灾害威胁和损失的性质和状态, 受损后难于恢复到原来状态和功能的性质^[11]。主要体现在地表、地下水资源数量、质量, 水资源循环更新速率、水资源承载能力等^[17]。水资源脆弱性是一个相对的、不能直接测量的、无量纲的参数, 且具有地域性^[18]。

3.2. 水资源脆弱性评价分类

水资源脆弱性评价主要有两种, 即定性评价和定

量评价^[19]。前者通过系统分析得到影响水资源脆弱性的主要因素, 从而提出降低水资源脆弱性的对策。后者为定量化的衡量水资源脆弱性, 常引入脆弱度的概念, 其数值越大, 脆弱度越大, 抵抗干扰的能力越差, 一旦受到破坏, 恢复能力也越差^[11]。

3.3. 构建评价指标体系

3.3.1. 指标体系构成

参考文献[12], 按水资源脆弱性形成因素, 将其分为自然脆弱性、人为脆弱性、承载脆弱性三大类。

1) 自然脆弱性

指构成水资源系统结构的自然要素, 表现为系统内部固有的敏感性。采用降水量、蒸散发等气候因子, 土壤类型、厚度、结构以及地形地貌等基本固定不变的因子等。

2) 人为脆弱性

指在人类活动影响下, 水资源系统内部结构的改变对其外力驱动系统的脆弱性。主要影响因素有: 通过提水、引水、蓄水等水利工程建设来改变水资源的空间分布; 人类活动对下垫面的结构的改变, 包括森林覆盖率、耕地面积、土地沙化面积等; 在开发利用水资源的过程中, 对水资源的管理水平, 表现为水资源的利用效率等。

3) 承载脆弱性

指水资源系统对某种特定的人类不合理活动, 或在服务于区域生态经济系统时所表现的敏感性。主要采用人口数量、经济产值、消费水平等因子, 反映了人类社会经济活动给水资源系统带来的压力。

3.3.2. 指标选取原则

水资源系统比较复杂, 层次多, 相互间会产生作用, 要从众多指标中选取一些主导性指标作为评价因子。文献[20]中指出指标选取应遵循以下 6 个原则:

1) 科学性原则: 指标的选择一定要建立在科学的基础之上, 能够较好的度量水资源管理的状况、方略、规划目标。2) 完整性原则: 要求指标覆盖面广, 能够综合反映水资源脆弱性的各个方面。3) 可操作性原则: 选择的指标应当简单, 易于定量表达, 易于取得数据且费用合理。4) 主导性原则: 应该尽量选择那些最具有代表性的综合指标。5) 独立性原则: 不同度量指标往往会存在信息上的重叠, 要合理选择, 尽量保持指

标的独立性。6) 动态性原则: 水资源系统是不断变化的, 它与生态系统及社会系统对水资源共同作用, 因此选择的指标要能够显示其随时间变化的趋势。

3.3.3. 指标筛选方法

指标筛选方法多样, 一般根据指标的筛选原则来选择。其中理论分析法、专家咨询法应用较普遍^[21]。理论分析法是指研究者根据自身的理解和判断, 确定评价指标。专家咨询法则是根据专家意见选择指标。

大部分研究者采用理论分析法自行确定指标。研究区域和研究目的的不同决定了研究的侧重点不一样, 选取指标时需要具体考虑。比如我国的水资源空间分布极不均匀, 南方地区水资源相对丰富, 水资源开发利用以地表水为主。那么, 对于南方地区的水资源脆弱性研究应侧重于地表水资源系统, 及因降水时空分配不均引起的季节性缺水问题。同时越是发达的地区, 对于社会脆弱性这一类指标就越重视。此外, 尽量采用相对量指标取代绝对量指标, 如人均、百分比、增长率、效益等, 可以使选取的指标具有较强的综合性、代表性和可比性。

3.4. 指标权重确定

指标权重的确定主要有主观赋权法和客观赋权法^[22]。主观赋权法是一种定性分析方法, 一般由决策者根据主观偏好或经验判断给出。其确定方法主要有: 专家调查法、层次分析法、模糊评价法等。客观赋权法是一种定量分析方法, 一般由建立的指标体系所提供的信息给出。其确定方法主要有: 主成分分析法、因子分析法、变异系数法、熵权系数法等。

3.5. 评价方法

水资源脆弱性的定量评价方法, 主要分为两类: 一类是从分析水资源脆弱性涵义和构成因素上入手构建指标体系, 采用某种综合评价方法, 得出水资源的脆弱性, 主要有模糊评价法、综合指数法, 灰关联评价法、主成分分析法、迭置指数法等, 或将几种方法结合。评价过程一般分为三步: 第一步建立指标体系, 第二步确定指标权重, 最后采用多指标加权进行综合评价。如刘绿柳^[11]将迭置指数法中的系统参数法与背景值法相结合, 给出了水资源脆弱性的评价方法。第二类是从水资源脆弱性系统中各个因素的相互

作用关系入手, 构建数学方程, 并通过不同变量将这些数学方程耦合成水资源脆弱性量化模型。这类方法可以从本质上说明水资源脆弱性与水资源、社会经济和生态与环境等各个因素之间的关系, 但理论基础还有待进一步拓展。

4. 海河流域水资源脆弱性评价

4.1. 流域概况

海河流域水系分散, 河流众多, 山丘区为主要产流区, 平原区地下水资源相对丰富, 是中国洪、涝、旱、碱灾害严重地区之一。流域年内降雨分配极为集中, 80%左右集中在6~9月份, 且往往集中在几次强降雨过程, 在全国各大江河中最为突出。海河流域水资源主要表现为: 降水时空分布不均, 经常出现连续枯水年, 水资源总量少和水资源量呈衰减。海河流域供水工程众多, 水源复杂, 以地下水为主。长系列的水资源供需资料表明, 海河流域水资源供求状况变化明显, 缺水和水污染突出, 经济社会的发展对水资源的需求远远超过了其承载力。

4.2. 指标体系及评价方法

通过分析海河水资源的特性, 在现有资料的基础上, 选取以下9个指标构建了水资源脆弱性评价指标体系: 年降水量(X1)、农业用水比例(X2)、水资源总量(X3)、生活用水比例(X4)、地下水占用水量比例(X5)、水资源开发利用程度(X6)、人口密度(X7)、人均国内生产总值(X8)、第三产业产值比重(X9)。其中, X1、X3反映了区域水资源的丰富程度, 属于自然脆弱性; X2、X4、X5、X6反映了人类活动影响下水资源的配置及开发利用程度, 属于人为脆弱性; X7、X8、X9反映了人口社会经济发展水平, 属于承载脆弱性。

主观赋权法中的专家调查法、层次分析法、模糊评价法等需要决策者进行主观判断, 综合评价中需要将各个指标定量化, 或者进行打分, 目前还没有一个统一的评价标准, 即使有标准也会因人而异, 缺乏准确度和说服力。客观赋权法的权重来自于对客观数据和信息的处理, 能够反映评价对象的情况。主成分分析法可以确定客观权重并进行综合评价, 且结果比较理想。因此本文选定主成分分析法作为海河流域水资

源脆弱性的综合评价方法。

4.3. 评价结果及分析

对海河流域范围内8个省市进行水资源脆弱性评价。首先, 采用主成分分析法确定主成分, 计算主成分贡献率, 最后通过加权平均计算水资源脆弱性综合得分, 与全国的水资源脆弱性得分进行比较。综合得分越低, 水资源的承载力越小, 水资源系统越脆弱。

以1998年主成分计算结果为例进行详细分析。从表1和表2中可以看出前3个主成分(年降水量、农业用水比例、水资源总量)的贡献率总和为0.9058, 超过所选定的标准85%。第一主成分中第2、4、7、8、9项指标的系数绝对值较大, 即对主成分影响较大的因素是农业用水比例、生活用水比例、人口密度、人均国内生产总值、第三产业产值比重, 可以看做第一主成分主要体现的是人类社会对水资源的需求压力造成的。第二主成分中第1、3、5项指标的系数绝对

Table 1. Principal component loading table in 1998
表 1. 1998 年主成分荷载表

| 指标序号 | 主成分 | | |
|------|---------|---------|---------|
| | 1 | 2 | 3 |
| X1 | 0.4697 | -0.7687 | 0.1937 |
| X2 | -0.7273 | -0.5618 | -0.2391 |
| X3 | 0.3654 | -0.7136 | 0.5596 |
| X4 | 0.8532 | 0.4960 | 0.1373 |
| X5 | -0.2153 | 0.7189 | -0.1780 |
| X6 | 0.3151 | -0.3604 | -0.8713 |
| X7 | 0.7940 | -0.2839 | -0.5162 |
| X8 | 0.9673 | 0.1252 | -0.0481 |
| X9 | 0.9469 | 0.1718 | 0.1119 |

Table 2. Eigenvalues and the contribution rate of annual principal component
表 2. 年主成分特征值及贡献率

| 主成分 | 特征值 | 贡献率% | 累计贡献率% |
|-----|------|--------|--------|
| 1 | 4.57 | 0.4688 | 0.4688 |
| 2 | 2.14 | 0.2705 | 0.7393 |
| 3 | 1.76 | 0.1665 | 0.9058 |
| 4 | 1.54 | 0.065 | 0.9708 |
| 5 | 1.08 | 0.0237 | 0.9945 |
| 6 | 0.95 | 0.0041 | 0.9986 |
| 7 | 0.74 | 0.0014 | 1 |

Table 3. The score of water resources vulnerability of 8 provinces in Haihe River Basin and in China
表 3. 海河流域各省市及全国水资源脆弱性综合得分

| 年份 地区 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 北京 | 9.91 | 10.78 | 11.08 | 9.77 | 9.16 | 10.85 | 10.07 | 9.98 | 11.56 | 11.16 |
| 天津 | 3.86 | 5.87 | 5.92 | 4.49 | 4.80 | 6.23 | 4.54 | 3.33 | -0.02 | 1.16 |
| 河北 | -4.26 | -4.51 | -3.84 | -4.61 | -4.91 | -4.51 | -2.35 | -4.67 | -2.26 | -1.29 |
| 山西 | -1.09 | -1.76 | -2.15 | -1.69 | -1.50 | -3.14 | -0.89 | -1.65 | 0.18 | -0.94 |
| 山东 | -5.60 | -3.83 | -2.59 | -4.47 | -3.30 | -1.10 | -6.29 | -2.93 | -5.72 | -8.06 |
| 河南 | -4.51 | -2.68 | -1.21 | -3.00 | -3.00 | -2.19 | -3.51 | -0.92 | -4.08 | -1.57 |
| 内蒙古 | -1.59 | -4.27 | -5.76 | -4.22 | -5.41 | -5.55 | 1.38 | -5.30 | 2.52 | -0.21 |
| 辽宁 | 4.46 | -0.24 | -1.22 | 0.67 | -0.63 | -1.45 | 3.27 | -2.31 | -0.03 | -0.89 |
| 全国 | -1.17 | 0.65 | -0.23 | 3.06 | 4.77 | 0.86 | 3.86 | 4.46 | -2.16 | 0.62 |

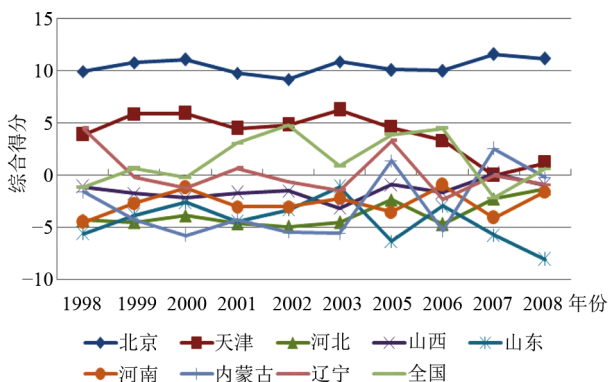


Figure 1. The score of water resources vulnerability of 8 provinces in Haihe River Basin and in China
图 1. 海河流域各省市及全国水资源脆弱性综合得分

值较大, 即对主成分影响较大的因素是年降水量、水资源总量、地下水占用水量比例, 可以看做第二成分主要体现的是水资源数量及分布, 即水资源系统的脆弱性。第三主成分中的第 6 项指标, 即水资源开发利用率的系数绝对值较大, 主要体现的是水资源的供需矛盾。目前我国的水资源开发利用率为 20%, 国际上一般认为对一条河流的开发利用不能超过其水资源量的 40%。据资料显示, 海河流域的水资源开发利用率达到 95% 以上, 远远超过了流域开发利用率的阈值。

从表 3 和图 1 中可以看出全国水资源脆弱性基本处于中上水平, 海河流域 8 个省市的综合得分大部分都比全国综合得分低, 说明海河流域水资源比较脆弱, 符合实际情况。8 个省市中北京、天津两个省市的水资源脆弱性综合得分基本都是最高, 河北、山东、河南、内蒙古几个省市水资源脆弱性综合得分较低,

即水资源脆弱性普遍低于全国水平, 属于海河流域中水资源比较脆弱的几个省市。

事实上, 北京、天津作为我国北方两个特大型城市, 本身水资源十分短缺, 承载着巨大的人口和水资源压力, 近年来地下水开采严重, 水资源十分脆弱, 而且 10 年来两市的水资源脆弱性得分变化幅度明显比其他省市的幅度要小。经分析是由于两个地区的水资源供应保障比较好, 外调水比较多, 缓解了供需矛盾。

5. 结论及展望

本文在总结前人研究的基础上, 建立了海河流域水资源脆弱性的评价指标体系, 采用主成分分析法, 对海河流域 8 个省(市)及全国 10 年的水资源脆弱性进行了综合评价, 得到以下结论:

1) 在方法应用上, 采用主成分分析法有利有弊。首先, 主成分分析法避免了赋权重及选取评价标准的主观性。其次, 主成分分析法通过线性变换, 把 9 个评价指标转化成了几个不相关的主成分指标, 最后以这几个主成分指标与贡献率的乘积, 采用加权平均法进行综合评价, 解决了评价指标之间可能相关的问题。缺点是从指标的标准化处理及一系列的数学计算中, 可能把各个指标的重要性等同化了, 得出来的权重系数有些可能是不大合理的, 从而影响综合评价结果的精确性。

2) 随着人口的增长和经济的发展, 海河流域水资源供需矛盾日益尖锐。为了缓解海河流域水资源压力, 维持流域内经济生态的协调发展, 有必要进一步

开展气候变化下海河流域水资源脆弱性的研究, 实现气候变化影响的变率、水资源脆弱性与适应性对策的联系。通过区域经济、政策和基础设施建设多种手段, 合理的调控水资源开发利用率、人均用水量等关键控制变量, 与“三条红线”的水资源管理建立联系, 从而达到水资源的合理配置和可持续发展。

3) 寻找适宜的对策以降低水资源的脆弱性, 是研究水资源脆弱性的意义所在。目前的研究工作一般都具有明显的区域特征, 缺少对一些共性问题的研究, 导致研究结果缺乏可比性和广泛的适用性。因此, 明确水资源脆弱性的内涵, 建立完整和具有共性的评价指标体系是未来研究需要不断完善的方向。

参考文献 (References)

- [1] 夏军, 刘春蓁, 任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J]. 地球科学进展, 2011, 26(1): 1-12.
XIA Jun, LIU Chunzhen and REN Guoyu. Opportunity and challenge of the climate change impact on the water resource. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(1): 1-12. (in Chinese)
- [2] 任宪韶. 面向 21 世纪的海河水利[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1999.
REN Xianshao. *Haihe River for the 21st century*. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1999. (in Chinese)
- [3] 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. *Environmental Geology*, 1999, 39(2): 165-176.
- [4] HEWITT, K. *Regions of risk*. Singapore City: Longman Singapore Publisher (Pte) Ltd., 1997.
- [5] National Research Council (US). *Ground water vulnerability assessment predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty*. Committee on Techniques for Assessing Ground Water Vulnerability. National Research Council, Washington DC: National Academy Press, 1993: 204.
- [6] RAHMAN, A. A. GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Applied Geography*, 2008, 28(1): 32-53.
- [7] 姜桂华. 地下水脆弱性研究进展[J]. 世界地质, 2002, 21(1): 33-38.
JIANG Guihua. The development of study on groundwater vulnerability. *World Geology*, 2002, 21(1): 33-38. (in Chinese)
- [8] 杨国民, 祁福利. DRASTIC 地下水脆弱性评价方法及其应用: 以阜新盆地为例[J]. 黑龙江水专学报, 2010, 37(2): 45-47.
YANG Guoming, QI Fuli. Groundwater vulnerability assessment with DRASTIC method and its application in Fuxin Basin. *Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering*, 2010, 37(2): 45-47. (in Chinese)
- [9] 郑西来, 吴新利, 荆静. 西安市潜水污染的潜在性分析与评价[J]. 工程勘察, 1997, 4: 22-24.
ZHEN Xilai, WU Xinli and JING Jing. The potential analysis and evaluation of phreatic water pollution in Xi'an. *Engineering Survey*, 1997, 4: 22-24. (in Chinese)
- [10] 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. *Advances in Earth Sciences*, 2000, 15(3): 313-317. (in Chinese)
- [11] 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 Luli. Concept and quantitative assessment of vulnerability of water resource. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2002, 22(2): 41-44. (in Chinese)
- [12] 邹君, 刘兰芳, 田亚平, 等. 地表水资源的脆弱性及其评价初探[J]. 地理科学进展, 2007, 29(1): 92-94.
ZOU Jun, LIU Lanfang, TIAN Yaping, et al. Concept and quantitative assessment of vulnerability of surface water resource. *Resources Science*, 2007, 29(1): 92-94. (in Chinese)
- [13] 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.
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. (in Chinese)
- [14] 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, 2002, 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*, 2002, 28(2): 76-80. (in Chinese)
- [15] 邹君, 杨玉蓉, 毛德华, 等. 湖南省农业生态水资源库脆弱性评价[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 196-202.
ZOU Jun, YANG Yurong, MAO Dehua, et al. An assessment of vulnerability of agricultural ecological water resource bank in Hunan province. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(1): 196-202. (in Chinese)
- [16] 商彦蕊. 自然灾害综合研究的新进展——脆弱性研究[J]. 地域研究与开发, 2000, 19(2): 73-77.
SHANG Yanrui. Vulnerability study—The new development of synthesized study on natural disasters. *Area Research and Development*, 2000, 19(2): 73-77. (in Chinese)
- [17] 李凤霞, 郭建平. 水资源脆弱性的研究进展[J]. 气象科技, 2006, 34(6): 731-734.
LI Fengxia, GUO Jianping. Major progress in water resource vulnerability research. *Meteorological Science and Technology*, 2006, 34(6): 731-734. (in Chinese)
- [18] 杨燕舞, 张雁秋. 水资源的脆弱性及区域可持续发展[J]. 苏州城建环保学院学报, 2002, 15(4): 85-88.
YANG Yanwu, ZHANG Yanqiu. Water resources vulnerabilities and regional sustainable development. *Journal of University of Science and Technology of Suzhou*, 2002, 15(4): 85-88. (in Chinese)
- [19] 陈攀, 李兰, 周文财. 水资源脆弱性及评价方法国内外研究进展[J]. 水资源保护, 2011, 27(5): 32-38.
CHEN Pan, LI Lan and ZHOU Wencai. Research progress on vulnerability of water resources and assessment methods at home and abroad. *Water Resources Protection*, 2011, 27(5): 32-38. (in Chinese)
- [20] 左其亭, 王中根. 现代水文学[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
ZUO Qiting, WANG Zhonggen. *Modern hydrology*. Zhenzhou: Yellow River Conservancy Press, 2006. (in Chinese)
- [21] 黄初龙, 章光新, 杨建锋. 中国水资源可持续利用评价指标体系研究进展[J]. 资源科学, 2002, 28(2): 33-40.
HUANG Chulong, ZHANG Guangxin and YANG Jianfeng. Indicators system for sustainability assessment of water resources use in China. *Resources Science*, 2002, 28(2): 33-40. (in Chinese)
- [22] 李因果, 李新春. 综合评价模型权重确定方法研究[J]. 辽东学院学报, 2007, 9(2): 92-97.
LI Yinguo, LI Xinchun. Weight determination of comprehensive evaluation model. *Journal of Eastern Liaoning University*, 2007, 9(2): 92-97. (in Chinese)