

# 基于压力驱动模型评价长株潭地区水资源脆弱性

周念清<sup>1</sup>, 赵露<sup>1</sup>, 沈新平<sup>2</sup>, 李正最<sup>3</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 湖南省洞庭湖水利工程管理局, 湖南 长沙 410007;

3. 湖南省水文水资源勘测局, 湖南 长沙 410007)

**摘要:** 以长株潭城市群水资源系统为例, 采用压力驱动DPSIR(驱动力-压力-状态-影响-反应)模型, 在全面识别水循环子系统、社会经济子系统和生态环境子系统脆弱性因子的基础上, 结合统计资料和专家评价, 详细阐述了脆弱性评价模型的建立过程, 采用层次分析法和熵权法相结合的组合权重法得到水资源系统各个脆弱性因子的权重, 并由此对水资源系统的脆弱性进行评价。研究结果表明: 长株潭城市群整体水资源系统脆弱性较大, 存在较多的不安全因素, 因此该地区水资源系统的脆弱性评价对于长株潭城市群的水资源系统可持续发展具有指导意义。

**关键词:** 水资源脆弱性; 压力驱动模型; 定量评价; 组合权重法; 长株潭城市群

**中图分类号:** TV 213.4

**文献标志码:** A

## A DPSIR Model for Vulnerability Assessment of Water Resources System in Chang-Zhu-Tan Area

ZHOU Nianqing<sup>1</sup>, ZHAO Lu<sup>1</sup>, SHEN Xinping<sup>2</sup>, LI Zhengzui<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Dongting Lake Water Resources Administration Bureau of Hunan Province, Changsha 410007, China; 3. Hunan Province Hydrology and Water Resource Investigation Bureau, Changsha 410007, China)

**Abstract:** Driving forces-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) model is used to assess the water resources system vulnerability of Chang-Zhu-Tan Area. Meanwhile, the establishment of vulnerability assessment model and evaluation process are described in detail based on the comprehensive identification of the vulnerability factors of the water cycle sub-system, the social-economic subsystem and the environment sub-system, combining the analytic hierarchy process (AHP) method with entropy method, weights of water resources vulnerability factors are obtained, as well as a

comprehensive evaluation on the water resources system vulnerability. The conclusion shows that the vulnerability of water resources system in Chang-Zhu-Tan Area is serious with several insecurity factors, so the vulnerability assessment can provide a technical guidance for the sustainable development of the water resources system in Chang-Zhu-Tan areas.

**Key words:** water resources vulnerability; driving forces-pressure-state-impact-response (DPSIR) model; quantifying assessment; combination weighting method; Chang-Zhu-Tan Area

水资源作为人类生存和发展不可或缺的条件, 在社会经济发展中有着重要的战略地位。近些年来, 由于全球气候变化和人类活动对水资源系统造成的不确定影响, 导致水资源短缺、水环境污染、水灾害频发等, 对人们的生产和生活构成了极大的威胁。水资源系统的脆弱性已成为制约人类社会可持续发展的重要因素。

“脆弱性”概念起源于生态学领域, 20 世纪 60 年代, 法国学者 Albinet 和 Marget 将脆弱性引入到地下水资源研究中, 之后关于地下水资源脆弱性的研究得到了进一步的发展, 取得了一系列的研究成果<sup>[1-2]</sup>, 水资源脆弱性的研究现延伸到地表水资源和整个水资源系统。国外学者 Sullivan 从水资源系统本身以及水资源使用者的角度出发对水资源脆弱性进行了评价<sup>[3]</sup>。Gan 和 Esqueda 等研究了气候变化可能对水资源脆弱性带来的影响<sup>[4-5]</sup>。在国内, 邹君等运用模糊物元模型, 从自然脆弱性、人为脆弱性和承载脆弱性 3 个方面对衡阳盆地农业水资源脆弱度进行了评价<sup>[6]</sup>; 冯少辉等运用相对偏差距离最小法对滇中地区的水资源脆弱度进行了评价和分析<sup>[7]</sup>;

收稿日期: 2012-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(41272249); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20110072110020)

第一作者: 周念清(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为水文学及水资源、地下水数值模拟与水环境评价。

E-mail: nq.zhou@tongji.edu.cn

张笑天等采用层次分析法 AHP(analytic hierarchy process)研究了漳河水库灌区水资源的脆弱性<sup>[8]</sup>。

本文以长株潭(长沙、株洲、湘潭的简称)城市群为例,根据水循环子系统、社会经济子系统、生态环境子系统中存在的水资源脆弱性问题,建立了水资源系统脆弱性评价体系,对水资源系统脆弱性进行综合评价,提出降低水资源系统脆弱性的措施,以便提高水资源系统的安全性和使用效率,对长株潭地区水资源的利用与可持续发展具有较重要的实际意义。

## 1 水资源系统脆弱性概念与内涵

### 1.1 水资源系统脆弱性的概念

“脆弱性”引入到地下水研究领域之后,许多学者围绕这一主题开展了深入的研究和探讨。不同学者或研究机构都给出了地下水脆弱性的定义,其中基本得到认可的是 1993 年美国国家科学研究委员会的定义,将地下水脆弱性分为内在脆弱性(intrinsic vulnerability)和特定脆弱性(specific vulnerability),认为地下水脆弱性是污染到达最上含水层之上某特定位置的倾向性与可能性<sup>[9]</sup>。

邹君等提出了地表水资源脆弱性的概念,即特定地域天然或人为的地表水资源系统在服务于生态经济系统的生产、生活、生态功能过程中,或者在抵御污染、自然灾害等不良后果出现过程中所表现出来的适用性或敏感性<sup>[10]</sup>。其他许多学者或将水量与水质相结合,或者是将地表水资源与地下水资源结合,各自都提出了对水资源脆弱性的定义<sup>[11]</sup>。综合国内外的研究成果,将区域水资源系统脆弱性概括为:在某特定区域内由水循环子系统、社会经济子系统和生态环境子系统构成的水资源系统,在受到自然变化和人类活动的影响下,系统功能减弱和难于恢复到原状态的性质。

### 1.2 水资源系统脆弱性的内涵

水资源系统脆弱性的内涵包括:① 水资源系统是一个复杂开放的大系统,是水循环子系统、社会经济子系统和生态环境子系统相互作用、相互耦合的结果(见图 1)。其脆弱性具有不确定性、敏感性、隐蔽性、突发性等特点。② 水资源系统的脆弱性是隶属系统本身的属性,但是通过外力胁迫而表现出来。系统的内在属性是系统脆弱性的根本原因,外力胁迫是导致脆弱性的直接原因。③ 水资源系统的脆弱性

体现在由供给驱动的水资源脆弱性(supply-driven water vulnerability)和由需求驱动的水资源脆弱性(demand-driven water vulnerability)两个方面。前者从水资源系统的角度出发,后者从水资源消费者的角度出发。

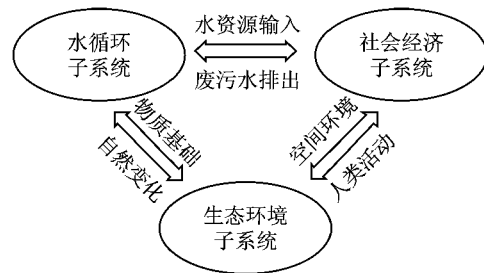


图 1 水资源系统

Fig.1 Water resources system

## 2 水资源系统脆弱性评价方法

水资源系统脆弱性的评价方法有:迭置指数法、过程模拟法、统计方法、模糊数学法等<sup>[12]</sup>,各种方法都有其适用范围和不足之处。近年来,许多学者提出了一些改进的评价方法,如:陈康宁等在对河北省水资源脆弱性进行评价时引入了分形理论<sup>[13]</sup>;董四方等则采用了大样本数据、投影寻踪、粒子群算法、插值型曲线等建立了基于粒子群投影寻踪插值的脆弱性评价模型<sup>[14]</sup>;刘海娇等在对黄河三角洲地区水资源脆弱性进行评价时,结合空间 GIS(地理信息系统)技术采用基于熵权的模糊优选模型<sup>[15]</sup>。由于水资源系统复杂多样,本文采用 DPSIR(driving forces-pressure-state-impact-response)模型来评价水资源系统的脆弱性。

### 2.1 水资源系统脆弱性评价模型的建立

DPSIR 模型是 1993 年由经济合作发展组织(OECD)首次提出,多用于资源、环境等可持续发展评价的概念性模型<sup>[16]</sup>。该模型从系统分析的角度描述了各个模块之间的相互作用:系统驱动力(D)导致了压力(P)的产生,从而使系统的状态(S)发生改变,系统状态的改变对系统产生影响(I),同时系统对这些影响进行响应(R)。

根据 DPSIR 模型,从驱动力、压力、状态、影响、响应等 5 个方面选取能够表征水循环子系统、社会经济子系统和生态环境子系统的脆弱性因子,依据全面性与代表性相结合、独立性与层次性相结合、定性与定量相结合、可操作性与可获得性相结合的指标选取原则,结合长株潭地区的实际情况,建立了如图 2 所

示的水资源系统脆弱性指标体系和评价模型。

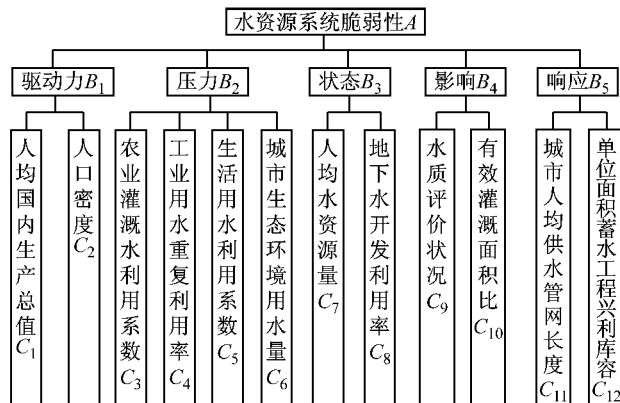


图2 水资源系统脆弱性评价模型

Fig.2 Hierarchical structure model for water resources system assessment

## 2.2 指标权重的确定

评价模型中,指标权重采用主客观权重相结合的组赋权法来确定,其中主观权重的确定采用层次分析法,客观权重的确定采用熵值法。

### 2.2.1 主观权重的确定

采用AHP确定主观权重时,首先建立“目标

表2 评价随机一致性指标  $R_1$  值

Tab.2 Average random consistency index  $R_1$

$n$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$R_1$	0	0.58	0.89	1.12	1.24	1.32	1.42	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59

$$Q_K = (q_{ij})$$

式中: $i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n; q_{ij}$ 表示  $X_i$  与  $X_j$  关于某个评价指标的相对重要性程度之比。

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j}{w_i}$$

式中: $\lambda_{\max}$ 为矩阵最大特征根; $a_{ij}$ 为判断矩阵系数; $w_i$ 为指标权重。

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

### 2.2.2 客观权重的确定

客观权重的确定采用熵值法,首先将评价对象记为  $A=(X_{ij})$ ,  $X_{ij}$  表示第  $i$  个样本第  $j$  个指标的属性值;对样本数据进行标准化处理,依次计算第  $j$  个指标第  $i$  个样本所占的比重  $p_{ij}$ 、第  $j$  个指标的熵值  $e_j$ 、第  $j$  个指标的差异度  $g_j$ ;最后通过计算得到第  $j$  个指标的权重  $w_j$ 。

$$p_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^n X_{ij}}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$$

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}$$

层—准则层—指标层”递阶层次结构模型;然后构造与各层次相关因素之间的判断矩阵,结合统计资料并参考专家意见,请专家根据 Saaty 标度法<sup>[17]</sup>对各层指标的两两相对重要性进行评分(见表1);计算层次单排序(同一层次各因素对于上层次某个因素相对重要性的排序权值)和层次总排序(指标层的因素对目标层的重要性排序权值);再对各层次的判断矩阵  $Q_k$  进行一致性检验,当平均随机一致性指标  $R_1$  (random index) 和一致性指标  $C_1$  (consistency index) 的比值  $C_R$  (consistency ratio) 小于 0.1 时(见表2),则判断矩阵具有满意的一致性;最后通过方根法计算出矩阵最大特征根及权重向量。

表1 Saaty 标度及其含义

Tab.1 Saaty-scale and its definition

标 度	含 义
1	表示 $X_i$ 与 $X_j$ 同等重要
3	表示 $X_i$ 比 $X_j$ 稍微重要
5	表示 $X_i$ 比 $X_j$ 明显重要
7	表示 $X_i$ 比 $X_j$ 强烈重要
9	表示 $X_i$ 比 $X_j$ 极端重要
2, 4, 6, 8	介于两相邻判断的中间值
倒数	赋值 $q_{ji}$ 存在关系 $q_{ji} = 1/q_{ij}$

式中: $k > 0, k = 1/\ln n, e_j \geq 0$ ; 当  $p_{ij} = 0$  时,规定  $p_{ij} \ln p_{ij} = 0$ 。

$$g_j = \frac{1 - e_j}{m - E_e}$$

式中: $E_e = \sum_{j=1}^m e_j; 0 \leq g_j \leq 1, \sum_{j=1}^m g_j = 1$ 。

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^m g_j}, 1 \leq j \leq m$$

### 2.2.3 确定组合权重

采用主、客观权重相结合的方法确定最终权重  $w = \theta w_1 + (1 - \theta) w_2$ , 其中  $w$  为组合权重,  $w_1$  为层次分析法所得的主观权重,  $w_2$  为熵值法所得的客观权重,结合实际情况,本文选定  $\theta = 0.5$ 。

## 2.3 水资源系统脆弱性指数计算

脆弱性指标分为正向指标和逆向指标两种。正向指标表示指标数据越大,系统脆弱性越大。逆向指标表示指标数据越大,系统脆弱性越小。数据标准化处理公式如下:

正向指标

$$q_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min j}}{x_{\max j} - x_{\min j}}$$

## 逆向指标

$$q_{ij} = \frac{x_{\max j} - x_{ij}}{x_{\max j} - x_{\min j}}$$

水资源系统脆弱性指数  $I_{wv}$  计算公式如下:

$$I_{wv} = \sum_{j=1}^n w_j q_{ij}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$$

式中:  $w_j$  为各组合对应的组合权重;  $q_{ij}$  为标准化后的指标值。

## 2.4 水资源系统脆弱性指数评价阈值

由于水资源系统具有复杂性、区域性、变化性等特点,在对区域水资源系统脆弱性进行定量评价时难以找到相关的固定脆弱性划分阈值.本文在参考相关文献并结合计算结果后,将长株潭地区水资源系统的脆弱性进行划分,如表 3 所示。

表 3 水资源系统脆弱性评价阈值

Tab.3 Water resources system vulnerability assessment criterion

脆弱性等级	重度脆弱	中度脆弱	轻度脆弱	不脆弱
阈值	>0.80	0.65~0.80	0.45~0.65	<0.45

## 3 计算结果与分析

## 3.1 研究区概况

长株潭城市群是由长沙、株洲、湘潭三市城区和若干紧密关联的周边组团构成的多核组团式城市群区域.地处湘江流域下游,东西宽约 50 km,南北长约 90 km,区域总面积 4 500 km<sup>2</sup>,属亚热带季风湿润气候区,四季分明,生长期长,降水充沛,热量充足.其境内汇入湘江的较大支流有 7 条,自上而下依次为:渌水、洣水、涟水、靳江河、浏阳河、捞刀河、洑水,区域内主要水库有石湾水库、官庄水库和酒埠江水库等,如图 3 所示。

长株潭城市群多年平均降水量 1 414.4 mm,降

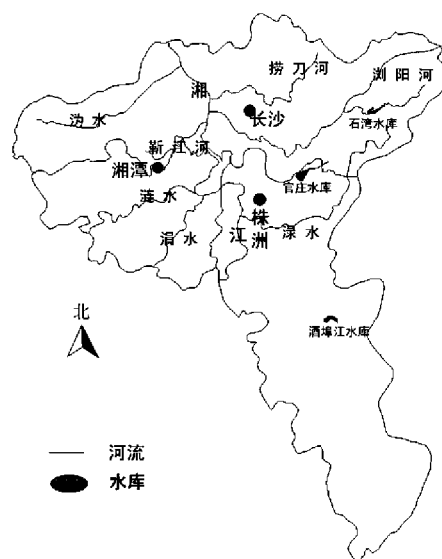


图 3 长株潭城市群区域规划图

Fig.3 Planning graph of Chang-Zhu-Tan Area

水量年际变化较大,年内分配不均匀.多年平均本地产水资源量为 35.21 亿 m<sup>3</sup>,2005 年末总人口 513.4 万人,人均水资源量为 686 m<sup>3</sup>,若计入上游来水量,人均水资源量达 1.35 万 m<sup>3</sup>.2011 年实现国内生产总值 8 307.7 亿元,人均 GDP 超过 6 万元。

## 3.2 水资源系统脆弱性评价结果与分析

长株潭城市群水资源系统采用 DPSIR 模型建立指标体系后,经计算得到 12 个指标的组合权重如表 4 所示,各指标的权重分布集中在 0.05~0.20 之间(见图 4),其中工业用水重复利用率( $C_4$ )、人均水资源量( $C_7$ )的组合权重最高,分别为 0.164 1, 0.130 8.这表明,工业发展大量用水对水资源系统造成的需水压力是导致水资源系统脆弱性变大的重要因素,而人均水资源量表征了水资源系统满足人类用水需求的能力,显然这也是加剧水资源系统脆弱性的关键因子。

表 4 水资源系统脆弱性评价指标权重

Tab.4 Weights of water resources system vulnerability indicators

准则层	指标层	准则层权重	层次单排序	层次总排序	客观权重	组合权重
驱动力	人均 GDP( $C_1$ )	0.099 0	0.333 3	0.033 0	0.079 6	0.056 3
	人口密度( $C_2$ )		0.666 7	0.066 0	0.083 1	0.074 6
压力	农业灌溉水利用系数( $C_3$ )	0.466 1	0.236 1	0.105 3	0.078 9	0.092 1
	工业用水重复利用率( $C_4$ )		0.558 6	0.249 2	0.079 0	0.164 1
	生活用水利用系数( $C_5$ )		0.118 9	0.053 0	0.078 9	0.066 0
	城市生态环境用水量( $C_6$ )		0.086 4	0.038 5	0.099 3	0.068 9
状态	人均水资源量( $C_7$ )	0.241 9	0.750 0	0.181 4	0.080 1	0.130 8
	地下水开发利用效率( $C_8$ )		0.250 0	0.060 5	0.098 5	0.079 5
影响	水质评价状况( $C_9$ )	0.111 1	0.333 3	0.037 0	0.078 9	0.058 0
	有效灌溉面积比例( $C_{10}$ )		0.666 7	0.740 7	0.080 2	0.077 1
响应	城市人均供水管网总长度( $C_{11}$ )	0.101 9	0.250 0	0.255 0	0.084 0	0.054 7
	单位面积蓄水工程兴利库容( $C_{12}$ )		0.750 0	0.076 4	0.079 2	0.077 8

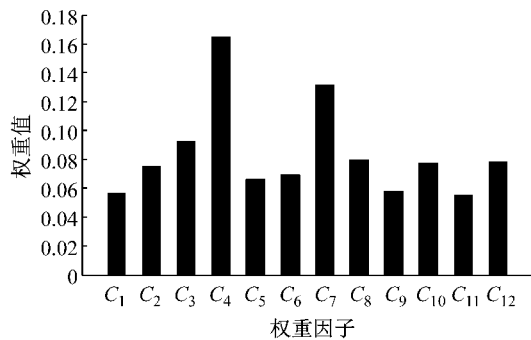


图4 脆弱性指标因子权重分布

Fig.4 Distribution of the weights of vulnerability indicators

通过计算,得到长株潭城市群水资源系统脆弱性指数如下:长沙的水资源系统脆弱性指数为0.3014,株洲为0.7549,湘潭为0.5975。参照表3,长沙属于水资源系统不脆弱区,株洲属于水资源系统中度脆弱区,湘潭属于水资源系统轻度脆弱区。长株潭城市群整体水资源系统脆弱性较大,存在较多的不安全因素。

计算结果可用图5表示,其中长沙的水资源系统脆弱性主要贡献因子为农业灌溉水利用系数( $C_3$ )、生活用水利用系数( $C_5$ )、城市生态环境用水量( $C_6$ )、单位面积蓄水工程兴利库容( $C_{12}$ );株洲的水资源系统脆弱性主要贡献因子为人口密度( $C_2$ )、农业灌溉水利用系数( $C_3$ )、工业用水重复利用率( $C_4$ )、人均水资源量( $C_7$ )、地下水开发利用率( $C_8$ )、有效灌溉面积比例( $C_{10}$ )、单位面积蓄水工程兴利库容( $C_{12}$ );湘潭的水资源系统脆弱性主要贡献因子为工业用水重复利用率( $C_4$ )、生活用水利用系数( $C_5$ )、人均水资源量( $C_7$ )、地下水开发利用率( $C_8$ )。

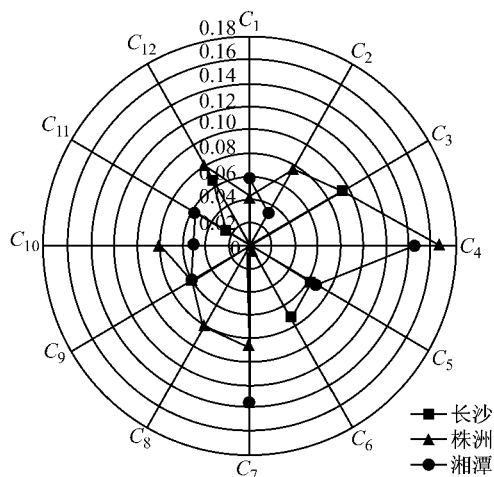


图5 长株潭城市群水资源系统脆弱性

Fig.5 Water resources system vulnerability of Chang-Zhu-Tan Area

## 4 水资源系统脆弱性控制措施

根据层次分析法和熵权法结合的组合赋权法得出各个脆弱性因子的权重。其中工业用水重复率权重最大,说明工业用水需求和节水技术水平对水资源系统的脆弱性的影响最大。因此,进行工业转型升级、改进工业生产技术,提高工业用水重复率是降低水资源系统脆弱性的重要途径。

采用 DPSIR 模型建立长株潭城市群水资源系统脆弱性评价指标体系,通过计算分析,可得到长株潭城市群水资源系统脆弱性有以下特点:长株潭城市群水资源系统承受的来自社会经济子系统和生态环境子系统的需水压力较大,是造成水资源系统脆弱性的决定性因素。其中又以来自社会经济子系统的需水压力最为严重,包括农业灌溉需水、工业生产需水和人民生活需水。除此之外,加强水资源管理的法律法规建设,进一步落实水务一体化、水利信息化,建立水资源应急预案,都有助于提高长株潭城市群水资源系统的安全性和应对极端事件的预警能力。

## 5 结论与展望

(1) 在长株潭城市群水资源系统脆弱性评价中,需水压力是最为重要的脆弱性贡献因子。因此,降低水资源系统脆弱性,关键在于合理规划社会经济子系统的需水要求,实现从传统的“以需定供”供水模式向“以供定需”模式的转变,从而提高水资源系统的安全性,实现水资源的可持续利用。

(2) 通过应用 DPSIR 模型建立水资源系统脆弱性评价体系,使得水资源系统的脆弱性因子识别更具有层次性和合理性,而组合赋权法使得脆弱性因子的权重确定更加全面、合理,既结合了区域的实际情况,又避免了完全的主观性。

(3) 水资源系统除了内部子系统相互影响的复杂机制之外,还存在一个不确定变化的环境,这也大大增加了研究的难度,因此,结合全球气候变化的水资源系统脆弱性研究必然会成为一个新的研究热点。

### 参考文献:

- [1] Aller L, Bennet T, Lehr J H, et al. DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater potential using

- hydrogeological settings [R]. Ada: Environmental Research Laboratory of US Environmental Protection Agency, 1987.
- [2] 孙丰英, 许光泉, 唐文锋. 灰色关联度法在地下水脆弱性评价与分区中的应用[J]. 地下水, 2009, 31(4): 15.  
SUN Fengying, XU Guangquan, TANG Wenfeng. Application of the gray correlation method for groundwater vulnerability assessment and partitioning[J]. Ground Water, 2009, 31(4): 15.
- [3] Sullivan A C. Quantifying water vulnerability: a multi-dimensional approach[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2011, 25: 627.
- [4] Gan T Y. Reducing vulnerability of water resources of Canadian Prairies to potential droughts and possible climate warming[J]. Water Resources Management, 2000, 14(2): 111.
- [5] Esqueda G S T, Ospina-Norena J E, Gay-Garcia C, et al. Vulnerability of water resources to climate change scenarios. Impacts on the irrigation districts in the Guayalejo-Tamesi River Basin, Tamaulipas, Mexico[J]. Atmosfera, 2011, 24(1): 141.
- [6] 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.  
ZOU Jun, YANG Yurong, TIAN Yaping, et al. Concept and assessment on vulnerability of agricultural water resource in hilly area of Southern China [J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(2): 302.
- [7] 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.  
FENG Shaohui, LI Jing, ZHU Zhenfeng, et al. Study on water resources vulnerability assessment in Central Yunnan [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(1): 13.
- [8] 张笑天, 陈崇德. 漳河水库灌区水资源脆弱性评价研究[J]. 华北水利水电学报, 2010, 31(2): 12.  
ZHANG Xiaotian, CHEN Chongde. Evaluation of vulnerability of water resources in the zhanghe irrigation district [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2010, 31(2): 12.
- [9] National Research Council of US Groundwater vulnerability assessment-predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty [M]. Washington D C: National Academy Press, 1993.
- [10] 邹君, 杨玉蓉, 谢小立. 地表水资源脆弱性: 概念、内涵及定量评价[J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 132.  
ZOU Jun, YANG Yurong, XIE Xiaoli. Concepts of vulnerability of surface water resource and its quantitative assessment[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(2): 132.
- [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.  
LIU Lüliu. Concept and quantitative assessment of vulnerability of water resource[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 22(2): 41.
- [12] 马芳冰, 王烜, 李春晖. 水资源脆弱性评价研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(1): 30.  
MA Fangbing, WANG Xuan, LI Chunhui. Research progress in water resources vulnerability assessment[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(1): 30.
- [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.  
CHEN Kangning, DONG Zengchuan, CUI Zhiqing. Evaluation of vulnerability of regional water resources system based on the fractal theory[J]. Water Resources Protection, 2008, 24(3): 24.
- [14] 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.  
DONG Sifang, DONG Zengchuan, CHEN Kangning. Analysis of water resources system vulnerability based on DPSIR conceptual model[J]. Water Resources Protection, 2010, 26(4): 1.
- [15] 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.  
LIU Haijiao, SHI Yuzhi, FAN Mingyuan, et al. Water resources vulnerability assessment in Yellow River Delta based on GIS[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(1): 34.
- [16] OECD. Organization for economic co-operation and development (OECD) core set of indicators for environment performance reviews[R/OL]. Paris: OECD, 2003 [2005-03-13]. <http://www.oecd.org/dataoecd/32/20/31558527.pdf>
- [17] Saaty T L. The analytic hierarchy process [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1980.