

# 水库型水源地系统脆弱性评价研究

张颖<sup>1</sup>, 翟瑞昌<sup>1</sup>, 王晨晨<sup>2</sup>

(1. 南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300071; 2. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 近些年来随着经济的高速发展,水资源短缺、水体污染问题日益突出,对水源地系统脆弱性进行评估以及做好预防和保护措施已成为当务之急。脆弱性评价有助于确定水源地的薄弱环节,为制定水资源保护措施提供指导。在总结前人研究的基础上,介绍了脆弱性及水源地脆弱性的概念,指标体系的构建原则以及目前评价水库型水源地脆弱性所采用的主要方法,最后对前人研究进行归纳总结,指出水源地脆弱性评价所面临的挑战及未来的发展方向。

**关键词:** 水库型水源地;脆弱性评价;指标体系;水资源保护

中图分类号:TV211.11

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2013)01-0005-05

## Study on vulnerability assessment of reservoir-type water sources

ZHANG Ying<sup>1</sup>, ZHAI Ruichang<sup>1</sup>, WANG Chenchen<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China;

2. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** With the rapid economic growth in recent years, the shortage of water resources and the water pollution become more and more serious. It becomes urgent to evaluate the vulnerability of water source system and take preventive and protective measures. Vulnerability assessment can help to determine the weakness existed in the water source and provide guidance for the determination of water resources protection measures. Based on previous study, the concept of vulnerability and water source vulnerability is described, and the principle for establishing the index system is presented, as well as the current main methods used to evaluate the vulnerability of reservoir-type water source. Finally, the challenges that vulnerability assessment of water source faces at present and the research orientation in the future are demonstrated.

**Key words:** reservoir-type water source; vulnerability assessment; index system; water resources protection

## 0 引言

21世纪以来,随着经济的高速发展,水源水质普遍下降,城市饮用水水源地安全已经成为影响城市供水安全和公众健康的重要因素。生产和生活用水量的日益增加,导致世界上许多国家都面临着严重的水资源短缺问题,而我国水资源短缺则更为严重。作为水资源系统的一部分,我国水源地系统目前所面临的形势同样严峻,加之近几年我国水源地污染事故频繁发生,如2005年11月13日中石油吉林石化公司双苯厂发生爆炸,100 t苯类污染物流入松花江,造成哈尔滨市停水4 d;2009年2月20日

江苏省盐城市由于城西水厂受酚类化合物污染,导致市区大面积停水;2011年8月12日,云南曲靖市陆良化工厂非法排污,将5 000 t铬渣倒入水库,致使水体中致命六价铬超标2 000倍,这些铬渣经雨水冲刷和渗透,逐渐把容量为20万m<sup>3</sup>的水库变成恐怖的“毒源”等,水源地的保护已经刻不容缓。水源地系统作为供水系统的首要部分,其状态直接影响到后续系统的正常运行和供水安全,在供水系统中具有非常重要的地位。随着各类水源地污染事件的发生,水源地供水安全问题开始受到各国的关注。针对水源地系统一系列的问题,国内外的学者对水源地脆弱性的概念、内涵以及评价方法进行了研究,

收稿日期:2012-10-13; 修回日期:2012-11-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51008207);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(65011941);天津市科技支撑计划重点项目(09ZCGYSF00600)

作者简介:张颖(1977-),女,四川成都人,副教授,主要从事水资源综合利用、水污染控制、环境风险评价方面的研究。

通讯作者:翟瑞昌(1987-),男,河北邢台人,硕士研究生,研究方向:环境工程专业。

分析了目前水源地脆弱性评价的方法和优缺点,并指出了水源地脆弱性评价面临的挑战及发展方向。

## 1 水源地脆弱性的概念和内涵

### 1.1 脆弱性的概念

20世纪70年代,风险评价开始被应用于城市供水系统的研究中,但是学者 Peng L H 在研究城市供水系统风险评价方法时,指出风险评价只从危险或威胁事件角度考虑风险,没有考虑到城市供水系统的内部固有属性应对威胁的性质,既没有考虑到系统“脆弱性”的影响<sup>[1]</sup>。“脆弱性”(vulnerability)最早应用于自然灾害方面的研究,而关于“脆弱性”的具体概念则是1981年由 Timmerman P. 在地质研究领域提出来的,他将脆弱性定义为系统在灾害发生时产生的不利响应程度<sup>[2]</sup>。随着社会经济的发展,“脆弱性”这一概念开始被广泛应用于包括自然灾害学、生态学、环境保护、可持续发展、气象学、工程学以及经济学在内的多个研究领域<sup>[3]</sup>。由于不同领域所涉及的研究对象和解决的问题不同,导致“脆弱性”这一概念在不同的研究领域所代表的内涵也不同,但在整个学术界,各国学者对“脆弱性”的理解大致存在以下五点共识<sup>[4]</sup>:①它是物质自身的一种客观属性;②外力消失后难以恢复原状;③它通过外力作用而表现出来;④脆弱性总是针对特定的扰动而言;⑤在脆弱性的概念中包含着一些共同的术语。国内外学者关于脆弱性概念的描述基本上都是从脆弱性的本质含义中引申出来的。如 Blaikie P. 等<sup>[5]</sup>将脆弱性定义为个体或群体系统对自然灾害的预料、应对、抵抗以及从自然灾害中自我恢复的特性。李鹤等<sup>[3]</sup>将脆弱性定义为由于系统(主要为子系统或者系统组分)对系统内外扰动的敏感性以及缺乏应对能力从而使系统的结构和功能容易发生改变的一种属性。它是源于系统内部的、与生俱来的一种属性,只是当系统遭受扰动时这种属性才表现出来。

### 1.2 水库型水源地系统脆弱性的概念

水库型水源地脆弱性是“脆弱性”这一概念在供水领域的具体应用。水库型水源地系统具有独特的水利特征和相应的地理环境条件<sup>[6]</sup>,如:①与河流型水源系统相比,水库型水源系统因为水的流动性相对较弱,污染物质扩散较差,污染物易沉积于水底,形成痼疾;②水库型水源地受到污染后造成的后果更为严重;③水库污染源的范围和面积相对固定可控,可以利用地理信息系统确定污染关键区并对

相关区域开展相应保护;④水库型水源地更容易受到人为的恶意攻击等。对其进行单独研究,有助于保障其供水功能的发挥,同时对促进具体水源地的研究保护具有十分重要的现实意义。水库型水源地属于地表水资源系统,其脆弱性概念与地表水资源系统的脆弱性在本质上具有共同之处。关于地表水资源系统脆弱性概念的定义最具代表性的是邹君等<sup>[7]</sup>在2007年提出的:“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”。

## 2 水库型水源地脆弱性评价方法

脆弱性评价是对自然或人文系统自身的结构和功能进行探讨,预测和评价外部威胁(自然或人为)对系统可能造成的影响,评估系统自身对外部威胁的抵抗力以及从不利影响中恢复的能力,为维护系统的可持续发展,减轻外部威胁对系统的不利影响和为退化系统的综合整治提供决策依据<sup>[8]</sup>。脆弱性的评价方法有很多种,但一般来说都要经过3个步骤:首先建立评价指标体系;其次确定各个评价指标的权重值;最后运用数学模型、统计学等方法计算水源地脆弱性的大小。下面分别对指标体系的构建和评价方法进行综述。

### 2.1 指标体系的构建原则与代表性指标体系

水源地系统脆弱性指标体系的构建必须符合一定的原则。虽然不同研究者构建的指标体系有所差异,但他们所采用的构建原则一致,一般主要包含以下几个方面<sup>[9]</sup>:①主导性原则:影响水库脆弱性的因素有很多,在构建指标体系时不可能将它们全部纳入指标体系中,应该有选择的选取那些最能反映水库脆弱性特征的指标,因为指标过多不仅增加工作量还会削弱主要指标的影响作用。②科学性原则:指标体系的建立应该从脆弱性的本质出发,采用科学的方法建立完备的指标体系,指标体系要能全面反映影响水库脆弱性的各项因素,既要包括反映内部特征的关键指标,同时还应包括作为外部驱动因素的指标。③操作性和可比性原则:指标计算所需要的数据应该易于获得,并且在统计学上具有可比性。④区域性原则:水库型水源地系统脆弱性评价往往是针对某一特定的水库区域而言,每个水库区域都有其特定的地理特点与气象水文等自然环境条件,因此在构建指标体系时应该充分考虑评价区域的地理特点、自然环境条件和当地的经济条件。

虽然,由于学者们对水源地系统脆弱性内涵的理解尚未达成共识,导致现在还没有构建出一个统一的指标体系,但是他们所采用的构建原则是一致的,因此得到的各个指标体系所反映本质内容是相同的。学术界构建水库水源地系统脆弱性指标体系

通常采用的方法就是将水源地系统脆弱性分为水质脆弱性和水量脆弱性,然后进一步将其分解为自然脆弱性、人为脆弱性以及承载脆弱性,最后确定具体的评价指标。表 1 列出了学术界普遍采用的水库型水源地系统脆弱性评价指标体系<sup>[7]</sup>。

表 1 水库型水源地系统脆弱性评价指标体系

目标层	准则层	评价指标
水量脆弱性	自然脆弱性	①年平均降雨量,②年平均蒸发量,③年降雨、蒸发变化率,④土壤蓄水能力,⑤地区干旱指数。
	人为脆弱性	①水量利用率,②水利工程的调蓄能力,③森林覆盖率,④污水处理、回用率,⑤水文建筑工程安全因素。
	承载脆弱性	①人均水资源量,②人均农业产值,③人均工业产值,④应急预案完善程度。
水质脆弱性	自然脆弱性	①水环境自净能力,②水体污染物质本底值。
	人为脆弱性	①生活污水处理率,②工业污水处理率,③年均突发污染事故。
	承载脆弱性	①人口密度,②人均污水排放量,③单位工业产值污水排放量,④单位农业产值污水排放量,⑤水源区域范围内工、农业量。

## 2.2 评价方法

水源地系统的脆弱性评价可分为简单的定性评价和定量评价,目前的评价方法以定量评价为主,结合适当的定性分析<sup>[9]</sup>。根据脆弱性的评价原则,水库型水源地系统脆弱性评价方法主要分为以下 4 类。

(1)综合指数法:综合指数法是目前在水库型水源地系统脆弱性评价中应用最为广泛的一种方法。该方法通过分析导致水库脆弱性的主要因素,构建相应的指标体系,利用统计方法或其他数学方法综合成脆弱性指数,来确定评价区域脆弱性的脆弱程度。目前在综合指数法中较为常用的方法有层次分析法(AHP)、加权求和法、主要成分分析法(PCA)、模糊综合评价法 4 种。樊彦芳等<sup>[10]</sup>曾采用层次分析法确定了水环境综合评价中的指标权重值,奠定了综合分析的基础;邹君等<sup>[11]</sup>用综合指数加权求和模型对衡阳盆地 7 个县(市)地表水资源系统进行脆弱性评价,得到的评价结果与实际情况相吻合,证明了该评价方法的合理有效性;杨建平<sup>[12]</sup>使用主要成分分析法对长江黄河源区的生态环境脆弱性进行评价,得出黄河源区东部的达日和玛沁县脆弱程度最高,为极脆弱地区,由此向西脆弱程度减弱,长江源区西南部唐古拉山乡的脆弱程度最小,为微脆弱地区,其余地区介于此二者之间,评价结果与实际相符;蒙海花、王腊春<sup>[13]</sup>将模糊综合评价理论应用到喀斯特地区的生态脆弱性评价研究中,得到的评价结果与实际情况吻合较好。综合指数法使用简便,容易操作,评价结果直观,因此在脆弱性评价中被广泛的应用。该方法可以将大量的环

境信息进行整合,并用一个简单的数学公式表示环境质量的总体水平。使用综合指数法评价特定的水库水源地系统脆弱性时,可以对水库区域的环境质量进行时空上的比较,同时还可以根据评价指数确定主要影响因子。但是由于环境系统客观存在的灰色性、脆弱性特征值的区域差异性、时态的变化性,导致获得的环境信息存在一定的不确定性和不完全性,因此评价结果是不全面的<sup>[14]</sup>。此外在确定一份合理的指标权重清单方面仍存在一定的困难,且综合指数法最后评价所得评价结果的有效性很难被验证<sup>[3]</sup>。

(2)以地理信息系统(geographical information system, GIS)为基础的图层法:GIS 是一种计算机技术系统,它以地理空间数据库为基础,可以对地理数据及相关数据进行采集、存储管理、分析处理和显示输出,其主要优势在于空间分析和空间数据管理<sup>[15]</sup>。近几年随着 GIS 技术的日渐成熟与完善,GIS 在评价系统脆弱性方面的应用逐渐增多,评价区域的范围逐渐扩大。图层法就是在 GIS 技术的基础上发展起来的,评价水库水源地系统脆弱性的一种评价方法。使用以 GIS 为基础的图层法对水库型水源地系统的脆弱性进行评价时可以很好的发挥 GIS 的地理分析的作用。根据 GIS 技术特点,可以把图层法分为两种:①脆弱性构成要素图层间的叠置。如郝璐等<sup>[16]</sup>运用该方法将内蒙古牧区雪灾孕灾环境的敏感性和载体对灾害适应性的空间差异性进行叠置,得出了内蒙古牧区雪灾脆弱性的空间差异。这种方法能够较好的反映出脆弱性的空间差

异,一般在对极端灾害背景下的区域进行脆弱性评价时使用。该方法适合对单个扰动进行评价,当威胁的数量多于一个时只能选取多种威胁类型的共性指标,导致选取的应对能力指标缺乏针对性,最后得出的评价结果不能反映区域某种特定威胁的脆弱性程度<sup>[3]</sup>;②针对不同扰动的脆弱性图层间的叠置。O'Brien K. 等<sup>[17]</sup>运用该方法对印度在气候变化和经济全球化双重扰动背景下的农业生产部门的脆弱性进行了评价验证。该方法适用于对多重扰动条件下的水库区域进行脆弱性评价,但是在评价过程中忽略了多种威胁对水库整体脆弱性影响的差异,对多种威胁的影响不能分出主次,因此无法依据评价结果提出减小系统脆弱性的可行性建议<sup>[3]</sup>。

(3) 数学模型法:数学模型是用符号、函数关系将评价目标和内容系统规定下来,并把互相间的变化关系通过数学公式表达出来。水源地系统脆弱性的数学模型是水源地系统所面临的外部威胁与本身适应能力之间的特定函数关系模型。运用数学模型法对水库水源地系统脆弱性进行评价,就是将脆弱性的组成要素定量化,然后把各要素间的关系用数学公式表示出来,建立脆弱性的评价模型,并用相应的统计方法或其他数学方法进行评价。数学模型法多与层次分析法、主要成分分析法联用,如杨维等<sup>[18]</sup>将数学模型法与层次分析法结合,对辽宁省水环境的承载力进行分析,并把分析结果和全国均值进行比较,得出辽宁省水环境的承载力比国家均值低,水质和水量的承载力是辽宁省水环境状况制约因素的结果。由于数学模型法在评价脆弱性时都是以定量的方式表示评价结果,所以能够直观的体现构成要素对脆弱性的影响程度,准确的解释脆弱性的主要原因,因此其应用范围更广。目前存在的主要问题是脆弱性与构成要素之间的关系尚未达成共识,使得该方法在应用过程中受到限制。

(4) 模糊物元法:给定事物的名称  $M$ , 它关于特征  $c$  的量值为  $v$ , 以有序三元组  $R(M, c, v)$  作为描述事物的基本元, 简称物元, 如果其中量值具有模糊性, 便称为模糊物元<sup>[19]</sup>。模糊物元法是通过计算各研究区域与一个选定参照状态(脆弱性最高或最低)的相似程度来判别各研究区域的相对脆弱程度。张俊华等<sup>[20]</sup>将模糊物元法应用于燕山水库的水质评价中, 得出燕山水库 80% 以上好于 III 类水质, 水质良好。运用模糊物元法对水库型水源地系统脆弱性进行评价的优势在于不用考虑变量间的相关性问题, 同时还可以消除不相容性和模糊性在评

价过程中所产生的影响, 而且操作方便、简单。它的缺点在于对参照单元的界定缺乏科学合理的方法, 评价结果所表示的只是评价区域脆弱性的相对大小, 不能反映脆弱性的主要特征。

### 3 结论与建议

近些年, 随着水源地问题的日益突出, 关于水库型水源地系统脆弱性的研究工作已经广泛开展, 但目前的研究工作仅限于较小的范围内, 具有明显的区域特征, 缺少对一些共性问题的研究, 这样就使得研究的结果缺乏可比性和广泛的使用价值。目前对于水源地系统脆弱性的研究仍面临着以下几个方面的挑战:

(1) 水源地脆弱性概念的统一: 目前由于研究工作的侧重点不同, 使得学者在对水源地脆弱性的概念进行时定义也有所偏重。因此, 到目前为止还没有一个统一的关于“水库型水源地脆弱性”的概念。“水库型水源地脆弱性”概念的不统一, 限制了它在实际中的应用, 已经成为水源地脆弱性研究发展的瓶颈, 是水源地脆弱性研究面临的一个挑战。

(2) 虽然对指标体系的构建原则已达成了基本的共识, 但在构建具体水库区域的指标体系时, 不同的学者之间仍存在分歧。大多数的学者习惯采用将所研究的问题分为几个系统的模式, 以便于筛选指标, 但是系统模式有多种分类方法, 每种模式都能建立自己的指标体系, 这就导致同一区域可以建立多种指标体系。因此, 如何建立一套统一而又科学的指标体系, 是脆弱性研究所面临的又一挑战。这是一项艰巨而又重要的基础工作, 需要学者继续努力才能更加的完善。

(3) 现有的评价方法对不同区域的评价结果之间缺乏可比性, 评价结果的质量难以检验。由于指标体系的选择不同以及各个指标权重的差异, 导致了评价结果的不同, 加之脆弱性形成原因的错综复杂性, 目前还没有一种方法能够检验各种评价方法所得到的评价结果的好坏, 因此无法判断评价结果的有效性。

结合目前水库型水源地系统脆弱性的研究现状, 上述挑战仍是学者以后研究的方向。同时, 为了解决由于不同研究者所建立的指标体系不同, 以及指标权重的差异所导致的评价结果不具有可比性的难题, 笔者建议引入“水库型水源地系统脆弱性评价范围”这一概念。通过对水力模型、气象水文条件、水体自净能力、污染物扩散性质等因素的研究,

将影响水库水源地系统水量、水质及其他安全方面的目标因素划定在一个确定的范围之内,然后将该范围内影响水库水源系统脆弱性的目标因素如水库大坝等水文建筑,水库自动控制管理系统,沿库道路与跨库桥梁等交通系统以及位于该范围内所有医院、工厂、仓库、污水厂或者其他建筑物的排污口等按水质脆弱性和水量脆弱性进行分类并评价。对确定好的同一范围内的水库系统进行脆弱性评价,所得评价结果能够反映实际情况,更具代表性,同时由于评价范围的确定使得评价目标更加的具体,最后得出的脆弱性评价结果也就更有可比性。决策者依据此评价结果所制定的预防和减缓措施更具现实意义。当然,具体水库型水源地系统脆弱性评价范围的确定方法需要学者们大量的研究验证。

#### 参考文献:

- [1] Peng L H. Hierarchical risk assessment of water supply systems[D]. Loughborough University, 2007:6-10.
- [2] Timmerman P. Vulnerability resilience and the collapse of society: A review of models and possible climatic applications[D]. Toronto, Canada: Institute for Environmental Studies, University of Toronto, 1981.
- [3] 李鹤,张平宇,程叶青. 脆弱性的概念及其评价方法[J]. 地理科学进展, 2008, 27(2): 18-23.
- [4] 王小丹,钟祥浩. 生态环境脆弱性概念若干问题探讨[J]. 山地学报, 2003, 21(6): 21-25.
- [5] Blaikie P, Cannon T, Davis I, et al. At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters[M]. Routledge, New York, 1994.
- [6] 刘书军,林孝松,斯珊,等. 湖库型水源地污染关键区识别与保护区划分——以梁平县沙坝水库为例[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(5): 1018-1021.
- [7] 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): 132-135.
- [8] 刘燕华,李秀彬. 脆弱性生态环境与可持续发展[M]. 北京:商务印书馆, 2001.
- [9] 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.
- [10] 樊彦芳,刘凌,陈星,等. 层次分析法在水环境安全综合评价中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 22(5): 512-514.
- [11] 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]. 资源科学, 2007, 29(1): 92-97.
- [12] 杨建平,丁永建,陈仁升. 长江黄河源区生态环境脆弱性评价初探[J]. 中国沙漠, 2007, 27(6): 1012-1017.
- [13] 蒙海花,王腊春. 贵州普定后寨河流域岩溶生态脆弱性的模糊综合评价[J]. 四川环境, 2007, 26(3): 62-66.
- [14] 陆仁杰,钱海雷,阚海东,等. 水质评价综合指数法的研究进展[J]. 环境与职业医学, 2009, 26(6): 581-584.
- [15] 冯立权,田卫,俞穆清. GIS在环境影响评价中的应用探析[J]. 遥感技术与应用, 2001, 16(4): 270-273.
- [16] 郝璐,王静爱,史培军,等. 草地畜牧业雪灾脆弱性评价——以内蒙古牧区为例[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 51-57.
- [17] O'Brien K, Leichenkob R, Kelkar U, et al. Mapping vulnerability to multiple stressors: climate change and globalization in India[J]. Global Environmental Change, 2004, 14(4): 303-313.
- [18] 杨维,刘萍,郭海霞. 辽宁省水环境承载力计算与分析[J]. 沈阳建筑大学学报, 2009, 11(1): 52-55.
- [19] 陈鸿起,汪妮,申毅荣,等. 基于欧式贴近度的模糊物元模型在水安全评价中的应用[J]. 西安理工大学学报, 2007, 23(1): 37-42.
- [20] 张俊华,杨耀红,陈南祥. 模糊物元模型在水库水质评价中的应用[J]. 水利能源科学, 2011, 29(1): 17-19.