

南方丘陵区生态水资源库脆弱度评价 ——以湖南省为例

邹 君^{1,2}, 王亚力¹, 毛德华¹

(1. 湖南师范大学资源环境科学学院, 长沙 410081; 2. 衡阳师范学院资源环境与旅游管理系, 衡阳 421008)

摘要:以南方生态水资源库为研究对象, 提出生态水资源库脆弱性概念, 分析了其脆弱性成因和主要表现。从脆弱性成因角度构建了包含 10 个具体指标的南方丘陵区生态水资源库脆弱性评价指标体系。以湖南为研究案例, 运用模糊物元评价模型对 85 个县级评价单元的生态水资源库脆弱度进行综合评判。结果表明, 全省生态水资源库脆弱性等级以中等脆弱为主, 其中, 微脆弱等级 3 个, 占总评价单元的 3.5%, 中等脆弱等级 70 个, 占总评价单元的 82.4%, 强脆弱 12 个, 占总评价单元的 14.1%。脆弱度空间分布存在“西部大于东部, 南部大于北部”的总体分布态势。其中, 以湘西北、湘西南和湘南所构成的外部环形地带和以长沙、衡邵盆地为中心的中东部地带为全省两个比较明显的高脆弱区(带)。

关键词:生态水资源库; 南方丘陵区; 脆弱性; 模糊物元模型; 湖南省

文章编号: 1000-0933(2008)08-3543-10 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Assessment of vulnerability of ecological water resource bank in hilly-land regions, South China: a case study of Hunan Province

ZOU Jun^{1,2}, WANG Ya-Li¹, MAO De-Hua¹

1 College of Resource and Environment Science, Hunan Normal University, Changsha, 410081, China

2 Resource Environment and Tourism Management Department, Hengyang Normal University, Hengyang 421008, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3543 ~ 3552.

Abstract: A new concept of vulnerability on ecological water resource bank was provided to analyze the formation and representation of vulnerability of water resource system, by investigating ecological water resource bank in the hilly-land regions in south China. On the basis of formation of vulnerability, the evaluation index system on vulnerability of water resource bank, including 10 concrete indices, was also constructed in the hilly-land regions in south China. The ten indices included precipitation, surface water subsystem, soil water subsystem, vegetable water subsystem and economic subsystem, then the evaluation index system of vulnerability of ecological water resource bank in Hunan Province was established using analytic hierarchy process (AHP). The vulnerability indices of ecological water resource bank were calculated in 85 counties of Hunan Province using fuzzy matter-element analysis method, Three grades (high, medium and low) were used in the evaluation index system. The main findings were: (1) Most counties showed medium vulnerability. The low, medium and high vulnerabilities accounted for 3.5%, 82.4% and 14.1% in the 85 counties, respectively. (2) The spatial distribution pattern was that the vulnerability in the west (or south) regions was higher than that in the east (or

基金项目:中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX3-SW-441); 湖南省自然科学基金资助项目(07JJ6066); 湖南省重点建设学科人文地理资助项目

收稿日期:2007-12-11; **修订日期:**2008-06-08

作者简介:邹君(1973~), 男, 湖南邵东人, 副教授, 博士生, 主要从事水资源研究。E-mail: zoujun4@163.com

Foundation item: The project was financially supported by project of CAS Knowledge Innovation Program (No. KZCX3-SW-441); National Science Foundation of Hunan Province (No. 07JJ6066); Supported by the construct program of the key discipline in Hunan Province

Received date: 2007-12-11; **Accepted date:** 2008-06-08

Biography: ZOU Jun, Ph. D. candidate, Associate professor, mainly engaged in water resource. E-mail: zoujun4@163.com

north) regions. Two significantly higher vulnerability zones included the external arc zone formed by northwest, southwest and south Hunan Province, and central-east zone centralized by Changsha, Hengshao Basin.

Key Words: ecological water resource bank; Hilly-land regions in south china; index of vulnerability; Fuzzy matter-element analysis method; Hunan Province

1 问题的提出

我国北方省份绝大部分属于资源型缺水的严重缺水地区,而南方则为丰水区和部分工程性缺水的脆弱区^[1]。因此,它们在水资源研究、水资源开发利用和管理等方面均存在明显的地域差异。资源型缺水的严峻事实催生了北方地区在水资源承载力^[2]、生态环境需水量^[3]、水资源合理配置^[4]、地下水资源脆弱性^[5]、气候变化的水资源区域响应^[6]等方面的丰硕研究成果。而总量上不存在缺水问题的南方丘陵区^[7],其水资源研究主要集中在季节性干旱形成的微观机理及其防治对策^[8~11];生态系统内部水分循环、水分运移和“五水”界面转换等微观水分运移问题^[12~15];微观试验研究成果运用到水资源的宏观管理^[7,16]以及基于气象台站和社会经济统计数据的水资源开发利用^[17]、区域和流域水资源管理^[18]、水资源可持续利用评价^[19]、水资源安全^[20]和洪涝灾害^[21]等宏观水资源管理研究。

纵观我国南方地区水资源研究,以下两个问题值得关注:①微观研究强于宏观研究:依托中国科学院生态实验监测站,南方地区水资源微观研究成果比较丰硕,而且呈递增趋势。而以区域和流域水资源可持续利用和管理为目标的宏观研究缺少稳定的研究队伍,多以散兵游勇为主,研究方向摇摆不定,缺乏系统性和高质量的研究成果;②宏观尺度的整体综合性研究成果少:其实,从宏观水资源管理层面上来看,研究水资源系统的内部结构、功能及其与人类经济系统之间的相互作用、相互影响等问题意义重大。由此看来,南方丘陵区水资源研究迫切需要从区域或流域宏观管理的角度系统综合地研究其结构和功能特征,以便为区域水资源宏观管理提供科学依据。

从资源环境科学领域有关脆弱性研究方面得到启发,试图提出南方丘陵区生态水资源库脆弱性概念,用系统综合的研究方法探究水资源系统的结构和功能特征,旨在为区域水资源开发利用和宏观管理提供科学依据。

2 南方丘陵区生态水资源库脆弱性及其表现

2.1 南方丘陵区生态水资源库的结构和功能

生态水资源库是指生态系统中所能储存降水的总容量,它是一个包括地表水系统、生物水库系统、土壤水库系统和浅层地下水系统的巨系统^[22]。南方地区主要以地表水资源的开发利用为主,地下水只占到极少份额。因此,不妨将南方丘陵区生态水资源库界定为生物水库、土壤水库、地表水系统三者之和。大气降水是生物水库、土壤水库和地表水系统的最终补给来源,它在三者之间的分配和转换关系则由其内部结构所决定。植被覆盖率、植被和土壤的结构及类型、地表水体容量大小等都直接影响到三者之间的转换关系。三者之间相互作用、相互影响,构成互为依赖和补充的巨系统。其中,地表水系统是人类经济活动直接取用水源的子系统,是区域农业发展、工业生产、居民生活以及生态环境建设需水的直接来源。但是,其功能的发挥受到土壤和生物水库的影响。也就是说,在南方生态水资源库系统中,其服务于生态经济系统的“生产”、“生活”和“生态”功能是由三子系统共同“协作”完成的,同时,三者之间又具有一定的“分工”关系。

地表水系统以其巨大蓄水容量对地表径流进行时空调蓄,从而有效地改变地表径流时空分布不均的状态。也就是说,地表水资源系统主要起蓄丰补缺的调蓄作用。土壤水库系统以土壤水形式向植物提供蒸腾所需水资源。由于容量的巨大,水分运移和界面传输的特殊性,使其成为有效吸纳大气降水、减少地表径流、提高雨水资源化效率的重要载体。因此,土壤水库既能够通过其持蓄功能来实现雨水的直接资源化,减轻洪水压力,还能够在旱季时对地表水及地下水系统进行补给。生物水库的水资源服务功能具有一定的隐蔽性。除

了给人类提供食物、药物等生活资料和其他生产资料以外,生物水库还具有强大的不可替代的水资源服务功能。一般来说,较高的植被覆盖率和良好的植被结构不但能够调节气候、改善降水的时空分布,还能够在水分界面传输和转换中起到极其重要的作用,从而影响土壤水库和地表水系统的功能发挥。由此可见,生物水库具有“削洪峰、缓径流、保水土、抗变异”等诸多功能,亦即实现生态水资源库系统内部各子系统之间的相互调节和稳定功能。

2.2 南方丘陵区生态水资源库脆弱性概念

“脆弱(性)(vulnerability)”作为一个物理概念具有三个方面的含义^[23]:①它是物质(或系统)自身的一种客观属性;②它通过外力作用表现出来;③外力消失后难以恢复原状。资源环境科学领域脆弱性研究主要集中在生态脆弱性、灾害脆弱性和资源脆弱性3个方面,其中尤以生态脆弱性和灾害脆弱性为甚。水资源脆弱性研究由来已久,但其研究对象基本上为地下水,区域地下水资源脆弱性评价和制图研究是近年来水资源领域研究的热点问题,国内外成果颇多^[5,24]。然而,较少有人从区域水资源系统角度研究其脆弱性。国内,刘绿柳提出了水资源脆弱性的概念,并且在分析其脆弱性内涵的基础上给出了水资源脆弱性定量评价的指标体系和评价方法^[26],应该说是我国南方地区水资源脆弱性研究的大胆尝试,但只限于初步理论探讨,许多问题都值得进一步研究,而且也没有对具体区域进行实证研究。本文依据联合国大学环境与人类安全研究所(UNU-EHS)的观点^[25]:脆弱性概念内涵扩展的变化趋势是由单纯针对自然系统的固有(天然)脆弱性逐渐演化为针对自然和社会系统的意义更为广泛的综合概念以及由以环境为中心,注重自然环境导致的脆弱性评价发展到以人为中心,注重人在脆弱性形成以及降低脆弱性中的作用。综上,本文将南方丘陵区生态水资源库脆弱性定义为:系统易于遭受和有无能力对付自然和人为因素变化的不利影响的程度。

2.3 南方丘陵区生态水资源库脆弱性成因及其典型表现

生态水资源库脆弱性取决于其内部结构和外部驱动力(压力)两大类因素。内部结构因素主要有:

(1)降水时空分布不均为首要结构性因素。因为,生态水资源库系统通过蓄存和调剂雨水来满足生态经济系统相对平稳的水资源需求。然而其蓄调能力是有限的,当降水时空分布不均超出系统蓄调限度时,系统平稳供水功能将会受到极大的影响,从而呈现出不同程度的脆弱性。

(2)地表水系统结构 影响地表水系统调蓄功能发挥的因素是生态水资源库系统脆弱性形成的重要因素。主要包括水库、山塘、围堰、湖泊等地表水体的蓄水容积、空间分布以及人类引水、提水能力等。一般来说,蓄水容积越大、分布越合理,其调蓄能力越强;水利工程的引水、提水能力越强,说明人类技术力量能有效地改变地表水资源时空分布的不均匀性,从而更好地满足生态经济系统平稳用水需求,减少系统的脆弱性。

(3)土壤水库结构 土壤水库持蓄功能的发挥主要取决于土壤类型、厚度、结构等自然特征。持蓄水能力强的土壤类型能够吸纳更多的雨水,从而更好的发挥土壤水库的持蓄功能。另外,坡度、坡向等地形因子也会影响土壤水库持蓄水功能的发挥,较缓的坡度有利于雨水资源特别是暴雨的充分下渗,提高雨水自然资源化率。

(4)生物水库结构 作为生态水资源库中的调节器,一般来说,植被覆盖率越高,调节能力越强,从而降低整个生态水资源库的脆弱性。

外部驱动力(压力)是南方丘陵区生态水资源库系统脆弱性的第二类因素。同样结构和功能的水资源系统,其外界生态经济系统需水压力越大,系统所呈现出来的脆弱性也会越明显。亦即,不管生态水资源库结构如何优良,只要人类经济活动的强度超出其所能承受的限度,其脆弱性即会显现。

生态水资源库脆弱性表现为各种形式的水资源问题。主要有:

(1)季节性干旱 是南方丘陵区生态水资源库脆弱性最为典型的表现,也是威胁区域农业发展的重要障碍因子;

(2)供水紧张问题 由于生态水资源库内部调蓄能力的有限性,枯水季节河流、水库、山塘等地表水体满足不了城市取水、山区人畜饮水等水资源供需矛盾问题;

(3) 洪涝灾害 一方面降水时空分配不均, 另一方面生态水资源库调控能力有限。因此, 雨季洪涝灾害是南方丘陵区生态水资源库脆弱性的又一重要表现;

(4) 水土流失 南方丘陵区由于其独特的自然结构而成为我国典型的水土流失区域之一。水土流失不但直接削弱土壤水库持蓄水能力, 还会大大降低地表水系统的调蓄能力。因此, 可以将其理解为生态水资源库脆弱性的形成因素。但是, 水土流失的发生是受生态水资源库系统结构直接制约的, 因此, 将其理解成由于生态水资源库结构和外力驱动(人类经济活动)所引起的一种后果也不失其科学性(图 1)。

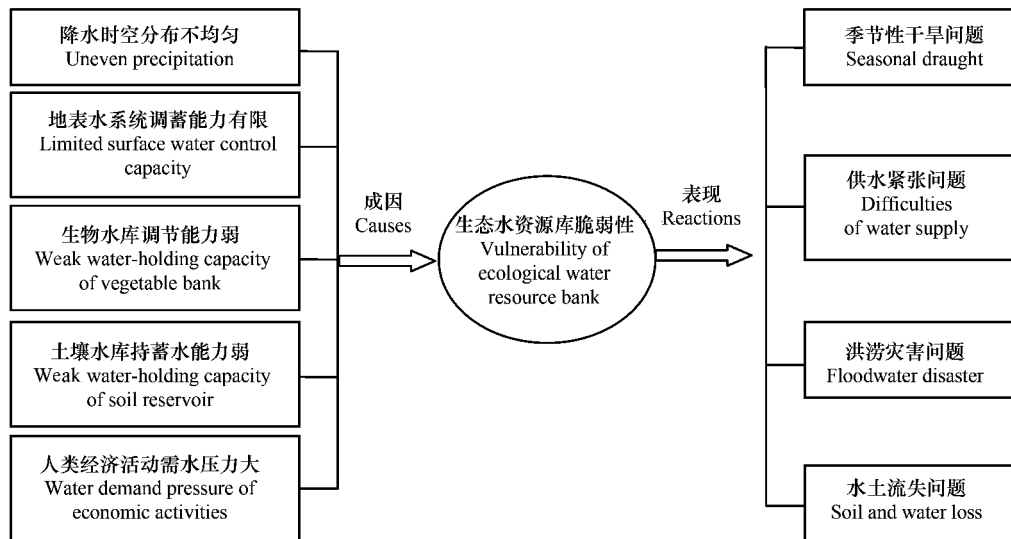


图 1 南方丘陵区生态水资源库系统脆弱性成因及其典型表现

Fig. 1 Causes and typical representations of water resource ecological bank in south china

3 南方丘陵区生态水资源库系统脆弱性评价案例

3.1 研究区概况

湖南位于长江中游南岸, 地处云贵高原向江南丘陵和南岭山脉向江汉平原的过渡地带。东、南、西三面为高耸山地环绕, 中部丘岗遍布, 北部为湖泊平原, 总体上构成一马蹄形的丘陵型盆地地形结构。区内河网纵横, 主要由湘江、资水、沅江、澧水和洞庭湖及环湖水系构成, 湘、资、沅、澧及其支流均由东、南、西三面汇入洞庭湖, 经城陵矶注入长江, 形成一比较完整的扇形水系。地表主要发育红壤、黄壤以及紫色土和冲积土, 红壤与黄壤约占 50% ~ 60%。境内森林覆盖率达 51.6% 以上, 居全国第 2 位, 但存在明显的地域差异, 西部山区高达 60% 以上, 而中部丘岗区较低, 衡阳盆地紫色土覆盖区仅 10% 左右。全省气候温和、热量丰富、雨量集中、雨热同季、四季分明。多年平均降水量 1427mm, 但时空分布极为不均, 春末夏初降水集中, 盛夏初秋少, 四周山区多, 中间丘陵地区少。湖南水资源比较丰富, 多年平均水资源总量 $1630 \times 10^8 \text{ m}^3$, 居全国第 6 位, 人均占有水资源量 2600 m^3 , 居全国第 13 位。

湖南为中部农业大省, 经济发展水平相对落后, 2006 年国内生产总值 7493×10^8 元, 居全国第 13 位, 人均 GDP 11830 元, 居全国第 20 位。3 次产业比重为 17.8:41.7:40.5, 人口 6768.1×10^4 人, 其中, 乡村人口 4148.17×10^4 人。湖南为全国重要的商品粮基地, 农业生产以种植业特别是粮食生产为主, 林牧渔业欠发达。2006 年农田灌溉用水占用水总量的比重达 60%。随着经济的快速发展, 水资源日益成为制约当地区域经济特别是农业可持续发展的主要障碍因子。

3.2 评价指标体系构建及数据来源

3.2.1 指标体系的建立

作为一个复杂巨系统, 需建立一个反映其脆弱性内涵和区域特征的评价指标体系对南方丘陵区生态水

资源库脆弱性进行评价。不失一般性,指标体系构建遵循科学性、区域性、可操作性、可比性以及简明性等原则。由于南方丘陵区水资源脆弱性研究成果尚不多见,无同类指标体系作为参考,因此,主要采用理论分析法和专家咨询法进行常用指标筛选来构建评价指标体系。在对评价系统区域地理特征及其脆弱性概念、内涵和影响因素深入理解的基础上,从水资源和生态环境等相关研究领域中选择出现频率高、能够反映评价系统脆弱性内涵的重要指标。然后征询有关专家对选取指标进行调整,最终确定脆弱性评价指标体系。

本文从脆弱性成因角度(图 1)构建湖南生态水资源库脆弱性评价指标体系(表 1)。指标层由描述我国南方丘陵区生态水资源库脆弱性特征的 10 个指标构成。 X_1 和 X_2 分别表征了降水时空分布的不均匀性,其中, X_2 采用 7~9 月份蒸发量除以同期降水量计算。 X_3 、 X_4 和 X_5 用来表征地表水资源系统调蓄水能力的强弱,其中, X_3 和 X_4 是地表水系统克服内部水资源空间分布不均能力的衡量指标。 X_5 则是从提高水资源利用效率、减少需水量的角度来表达水资源的脆弱性。南方地区作物结构以水稻为主,水田的水资源利用效率相对较低,因此,水田比重越大,其水资源利用效率会越低。土壤水库持蓄水能力用 X_6 、 X_7 两指标加以表征,是雨水在系统中分配、贮存、转换以及保持等方面的量化表达,直接关系到系统的抗旱和抗洪等功能的发挥。单位水资源 GDP(X_9)和人口密度(X_{10})两指标能够较好地反映区域水资源的供需关系和水资源的承载力,从而从人类经济活动需水压力角度表征系统的脆弱性。

表 1 湖南生态水资源库脆弱性评价指标体系

Table 1 Vulnerability assessment index system of ecological water resource bank in Hunan Province

目标 Object	准则层 Sub-object	具体指标 Index
生态水资源库系统脆弱度 Vulnerability of ecological water resource system	降水时空分布 Uneven of precipitation	多年平均降水量(X_1) Average precipitation(X_1)
		少雨期干旱指数(X_2) Drought index during July—Sep. (X_2)
	地表水系统调蓄能力 Capacity of surface water system	单位国土面积蓄水容积(X_3) Water capacity (X_3)
		有效灌溉面积比重(X_4) Ratio of available irrigation area(X_4)
		水田占耕地面积比重(X_5) Ratio of paddy to infield(X_5)
		土壤水库持蓄水能力
	Water-holding capacity of soil bank	坡度指数(X_6) Slope index(X_6)
	生物水库调节能力	土壤蓄水能力指数(X_7) Water-holding index of soil(X_7)
	Water-holding capacity of vegetable bank	森林覆盖率(X_8) Ratio of forest cover(X_8)
	人类经济活动需水压力	单位水资源 GDP(X_9) Ratio of GDP to water resource(X_9)
	Pressure of economic activities	人口密度(X_{10}) Density of population(X_{10})

3.2.2 定性指标量化及指标数据来源

X_6 为定性指标,先采用 3 级 100 分制打分(坡度小于 10° 计 90 分, $10^\circ \sim 20^\circ$ 之间计 60 分,大于 20° 计 30 分),然后以评价单元各级坡度土地面积的百分比作为权重与相应等级的分值相乘即可得到指标数值。 X_7 以各评价单元不同土壤类型的面积比重作为权重与相应土壤类型的蓄水能力指数相乘得到。其中,不同土壤类型的蓄水能力指数借鉴何福红等的研究成果^[27]。所有指标的原始数据均可通过统计年鉴或政府相关部门直接收集获得。其中, X_1 、 X_2 中的降水量和蒸发量采用 50a(1950~1999 年)平均值,原始数据分别来自湖南省农业区划数据集和湖南省气象局资料, X_6 、 X_7 来源于湖南省国土资源厅。其余指标数据来源于湖南省统计年鉴,时间均为 2005 年。

X_2 、 X_5 、 X_9 、 X_{10} 为正向指标,即指标数值越大,系统越脆弱,其余 6 个为负向指标。评价单元为湖南县级行政区划,市辖区不在评价范围之内,安乡和津市缺少某些数据而不在评价之列,评价单元共计 85 个。湖南省部分评价单元评价指标的原始数据值见表 2。

3.3 湖南省生态水资源库脆弱性评价

多层次、多指标、大系统的综合评价方法很多,也各有特点,但存在一个共同的问题,即多指标综合评价时

各单项指标的评判结果往往是不相容的,直接利用评价标准难以做出确切的评价,而且由于评价标准是界限明显的量化标准,势必导致遗漏一些有用的信息,甚至会得出错误的结论^[28]。因此,近年来在水资源综合评价领域出现了一种基于欧氏贴近度的模糊物元评价方法,该方法能够克服上述不足。本文尝试采用基于欧氏贴近度的模糊物元模型对研究区生态水资源库系统脆弱度进行综合评价。

3.3.1 生态水资源库脆弱度评价指标分级标准确定

按照模糊物元模型的要求,本文将脆弱度划分为3级,依次为微脆弱、中等脆弱和强脆弱。各指标临界值适当借鉴北方地区水资源评价指标划分的成果,更多的则是依据南方地区生态水资源库系统的特点来确定。为了使评价结果在广大南方地区具有较好的代表性和可移植性,具体操作时首先考虑研究区的最大和最小值,同时在南方更大范围内考虑各指标数值的极值分布。求出各指标的极差后,将其3等分,得到2个三等分点,相邻两个点的算术平均值即为所求临界值,各评价指标的等级临界值见表3。

表2 部分评价单元评价指标原始数值

Table 2 Evaluation index value in each evaluated unit (part of the total)

评价区 Evaluation units	X_1 (mm)	X_2	X_3 ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	X_4 (%)	X_5 (%)	X_6	X_7	X_8 (%)	X_9 (元/ m^3) (Yuan/ m^3)	X_{10} (人/ km^2) (Person/ km^2)
浏阳 Liuyang	1549.4	1.62	22.84	0.80	0.91	64	0.588	62.7	4.38	268.7
长沙 Changsha	1293.6	2.35	39.59	0.79	0.93	89	0.518	48.7	12.76	300.5
攸县 Youxian	1420.7	2.47	22.53	0.75	0.79	73	0.493	45.1	1.15	78.3
茶陵 Chaling	1321.8	2.31	13.76	0.68	0.80	56	0.492	45.7	0.71	62.5
衡南 Hengnan	1252.5	2.71	45.02	0.87	0.91	77	0.365	29.4	1.28	104.9
衡山 Hengshan	1365.1	2.60	34.67	0.59	0.83	80	0.526	44.4	1.35	121.1
邵东 Shaodong	1263.2	2.12	51.59	0.72	0.66	56	0.682	29.3	2.00	200.0
新邵 Xinsao	1291.3	2.21	23.19	0.57	0.70	49	0.581	49.8	0.79	123.7

表3 各评价等级指标临界值及权重

Table 3 Value and weight of each evaluation index about three grades

等级 Grade	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
微脆弱 Low	1610.5	1.18	86.76	0.886	0.573	76	0.619	64.7	0.435	96
中等脆弱 Medium	1428.9	1.86	52.26	0.686	0.720	61	0.510	47.5	1.438	188
强脆弱 High	1247.3	2.54	19.75	0.477	0.866	46	0.401	30.2	2.512	280
权重 Weight	0.185	0.117	0.190	0.128	0.085	0.095	0.041	0.034	0.075	0.050

3.3.2 评价模型的建立

(1) 确定复合模糊物元 对湖南省85个县级评价单元以及3个脆弱度等级共88个方案,依据评价指标原始数据和表3中的数据确定各方案中10个评价指标的复合模糊物元。

(2) 计算从优隶属度 正向指标采用式(1),负向指标采用式(2)计算:

$$\text{越大越脆弱型指标(正向指标)} \quad u_{ik} = x_{ik} / \max x_{ik} \quad (1)$$

$$\text{越小越脆弱型指标(负向指标)} \quad u_{ik} = \min x_{ik} / x_{ik} \quad (2)$$

式中, x_{ik} 为第*i*个评价单元第*k*项评价指标对应的量值; $\max x_{ik}$ 和 $\min x_{ik}$ 分别为各评价单元中每一项指标所有量值中的最大值和最小值。

(3) 确定标准方案模糊物元 根据步骤②所得的从优隶属度矩阵,选择各评价指标对应的各评价单元上的最大值组成标准模糊物元,即 $u_{0i} = 1, i = 1, 2, \dots, 10$ 。

(4) 计算各方案评价指标与标准方案指标之间的差的平方复合模糊物元 R_{Δ} (式(3)):

$$R_{\Delta} = \begin{matrix} & \text{浏阳} & \text{长沙} & \text{攸县} & \text{茶陵} & \text{衡南} & \text{衡山} & \text{邵东} & \text{新邵} & & \text{微脆弱} & \text{中脆弱} & \text{强脆弱} \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \end{matrix} & \begin{matrix} 0.060 \\ 0.196 \\ 0.886 \\ 0.280 \\ 0.001 \\ 0.266 \\ 0.149 \\ 0.466 \\ 0.432 \\ 0.023 \end{matrix} & \begin{matrix} 0.009 \\ 0.036 \\ 0.933 \\ 0.273 \\ 0.000 \\ 0.425 \\ 0.092 \\ 0.350 \\ 0.000 \\ 0.003 \end{matrix} & \begin{matrix} 0.031 \\ 0.022 \\ 0.884 \\ 0.246 \\ 0.025 \\ 0.331 \\ 0.072 \\ 0.312 \\ 0.828 \\ 0.567 \end{matrix} & \begin{matrix} 0.013 \\ 0.042 \\ 0.814 \\ 0.199 \\ 0.021 \\ 0.199 \\ 0.071 \\ 0.319 \\ 0.893 \\ 0.645 \end{matrix} & \begin{matrix} 0.004 \\ 0.004 \\ 0.941 \\ 0.323 \\ 0.001 \\ 0.357 \\ 0.000 \\ 0.104 \\ 0.809 \\ 0.448 \end{matrix} & \begin{matrix} 0.021 \\ 0.011 \\ 0.924 \\ 0.133 \\ 0.014 \\ 0.375 \\ 0.098 \\ 0.304 \\ 0.800 \\ 0.382 \end{matrix} & \begin{matrix} 0.005 \\ 0.072 \\ 0.949 \\ 0.229 \\ 0.087 \\ 0.199 \\ 0.222 \\ 0.103 \\ 0.711 \\ 0.136 \end{matrix} & \begin{matrix} 0.009 \\ 0.056 \\ 0.887 \\ 0.111 \\ 0.066 \\ 0.135 \\ 0.143 \\ 0.360 \\ 0.880 \\ 0.372 \end{matrix} & \cdots & \begin{matrix} 0.075 \\ 0.344 \\ 0.969 \\ 0.330 \\ 0.152 \\ 0.369 \\ 0.174 \\ 0.479 \\ 0.933 \\ 0.486 \end{matrix} & \begin{matrix} 0.033 \\ 0.124 \\ 0.949 \\ 0.203 \\ 0.055 \\ 0.234 \\ 0.085 \\ 0.338 \\ 0.787 \\ 0.166 \end{matrix} & \begin{matrix} 0.004 \\ 0.014 \\ 0.868 \\ 0.044 \\ 0.006 \\ 0.059 \\ 0.010 \\ 0.116 \\ 0.645 \\ 0.014 \end{matrix} \end{matrix} \quad (3)$$

⑤确定评价指标的权重 采用目前较为成熟的层次分析法(AHP)确定各评价指标的权重。首先通过邀请专家对层次指标进行两两比较构造判断矩阵,判断结果采用传统的9标度法,即两要素 F_1 和 F_2 比较,如果 F_1 和 F_2 同等重要,则比较结果取1, F_1 比 F_2 稍重要,则比较结果取3, F_1 比 F_2 明显重要,则比较结果取5, F_1 比 F_2 重要得多,则比较结果取7, F_1 比 F_2 极端重要,则比较结果取9,判断结果为上述两相邻结果的折衷,则取2、4、6、8中的某个值,最终结果为各专家判断结果的平均。然后,计算层次单排序及总排序,检验判断矩阵一致性及群组决策一致性;最后,采用加权几何平均综合排序向量法计算得到指标层各评价因子相对于生态水资源库脆弱性的权重。经计算得出各因子的权重见表3。

⑥计算欧氏贴近度 由于生态水资源库脆弱度的评价具有综合评价的意义,因此,采用 $M(\cdot, +)$ 算法计算欧氏贴近度 ρH_j (式(4)):

$$\rho H_j = 1 - \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i \Delta_{ji}} \quad (j=1, 2, \dots, 88) \quad (4)$$

式中, ρH_j 为第 n 个评价单元与标准方案之间的相互接近程度,其值越大,表示两者越接近;反之,则相差越远,然后以此来构造欧氏贴近度复合模糊物元 ρH_j (下式)

	浏阳	长沙	望城	宁乡	醴陵	株洲	攸县	茶陵	炎陵	湘乡	湘潭	耒阳	常宁	衡阳	衡南
ρH_j	0.435	0.476	0.465	0.469	0.427	0.412	0.412	0.433	0.528	0.406	0.410	0.427	0.412	0.420	0.415
	衡山	衡东	祁东	武冈	邵东	新邵	邵阳	隆回	洞口	绥宁	新宁	城步	汨罗	临湘	岳阳
ρH_j	0.427	0.418	0.439	0.436	0.436	0.441	0.433	0.438	0.415	0.503	0.432	0.582	0.400	0.389	0.395
	华容	湘阴	平江	汉寿	澧县	临澧	桃源	石门	慈利	桑植	沅江	南县	桃江	安化	资兴
ρH_j	0.447	0.442	0.408	0.422	0.405	0.389	0.355	0.401	0.379	0.494	0.455	0.438	0.384	0.367	0.392
	桂阳	宜章	永兴	嘉禾	临武	汝城	桂东	安仁	祁阳	东安	双牌	道县	江永	宁远	蓝山
ρH_j	0.432	0.454	0.419	0.434	0.445	0.426	0.438	0.413	0.409	0.410	0.393	0.425	0.420	0.440	0.533
	新田	江华	冷水江	涟源	双峰	新化	怀化市	洪江	沅陵	辰溪	溆浦	麻阳	新晃	芷江	会同
ρH_j	0.417	0.427	0.488	0.430	0.428	0.418	0.535	0.414	0.372	0.448	0.440	0.428	0.539	0.422	0.427
	靖州	通道	吉首	泸溪	凤凰	花垣	保靖	古丈	永顺	龙山	微脆弱	中脆弱	强脆弱		
ρH_j	0.431	0.422	0.432	0.465	0.442	0.428	0.473	0.483	0.481	0.460	0.332	0.420	0.518		

3.3.3 评价结果

根据上述评价结果可以得出以下结论:①脆弱度评价数值分布较为集中。85个县(市)评价数值的平均值为0.435,最小值为桃源的0.355,最大值为邵阳城步的0.582,极差0.227,标准差0.039。说明湖南省内部生态水资源库的脆弱度差异性不显著;②从脆弱度等级分布来看,85个评价县(市)三个等级均有分布,其中,微脆弱等级3个,为总评价单元的3.5%,中等脆弱等级70个,占总评价单元的82.4%,强脆弱12个,为总评

价单元的 14.1%。说明湖南省虽然位居亚热带湿润气候区,但由于降水资源时空分布不均、水利设施调蓄水能力有限以及经济快速发展带来的需求压力等诸多原因的影响,生态水资源库整体上呈现出一定的脆弱性。

③从空间分布来看(图 2),脆弱度存在“西部大于东部,南部大于北部”的总体分布态势。全省存在两个比较明显的高脆弱区(带),一个是湘西北、湘西南和湘南所构成的外部环形高脆弱带,绝大部分评价单元得分在 0.45 以上。另一个是以长沙和衡邵干旱走廊为中心的京广铁路西沿一线的中东部次高脆弱带,由北部的洞庭湖区向南经长沙、株洲、湘潭至南部的邵阳、衡阳大部。全省的低值区位于湘北的安化、沅陵、桃江、桃源和慈利所组成的圆形区域。

3.3.4 评级结果合理性及其原因分析

本文采用南方生态水资源库脆弱性的典型表现——季节性干旱发生的空间分布来检验评价结果的合理性和可靠性。上述评价结果与有关学者研究得出的湖南干旱灾害发生的地域分布规律具有较好的一致性^[29,30]。而且,各等级的空间分布具有一定的连续性,且高脆弱区连续性较差,这与湖南省干旱的“块块旱,插花旱”^[31]分布特征也极为吻合。这说明本研究构建的评价指标体系和评价方法具有较高的可信度,与实际情况相符合。

外部环形高脆弱带位于湘西的武陵雪峰山区和湘南的南岭山脉,虽然降水资源颇丰,但是由于山高坡陡、喀斯特地貌多有发育、紫色土分布面积广、且大多位于“四水”中上游,水土流失严重,土壤薄层化,水库、山塘淤积,山洪灾害频发。而且,地形复杂,耕地分散,水低田高,兴建大型水利工程的难度大等诸多原因,导致其生态水资源库脆弱度高;中东部次高脆弱带与降水量的空间分布具有较大的相关性,全带覆盖北部洞庭湖滨湖区和衡邵盆地“干旱走廊”两个少雨区。同时,该带大部分地区位于滨湖和河谷平原地区,水库、山塘等调蓄水设施相对较少,而且大部分位于本省区域经济发展的核心地带,经济发展水平高,因经济发展所带来的生态水资源库的承载压力也较大。脆弱度低值区为本省降水分布的高值区,年均降水量大于 1600mm,同时,该区位于沅江和澧水的下游,水利工程设施相对优越,加之经济发展水平在全省居于中等,各方面的因素综合使其成为全省生态水资源库脆弱度低值区。

3.3.5 高脆弱区的水资源可持续利用对策

为实现湖南水资源的可持续利用,有必要针对全省生态水资源高脆弱区进行合理水资源管理:①山丘区兴建一批中小型灌溉工程;外部环形高脆弱带地形复杂,修建大型灌溉工程难度大,因此,可以考虑兴建中小型水库、河坝引水及提水等供水工程,通过蓄引提相结合,增强其水资源调蓄能力。②强化生态建设,防治水土流失;湖南生态水资源库高脆弱区基本上位于“四水”中上游,为本省生态脆弱区和水土流失高发区。因此,有必要采取工程和生态措施相结合的水土流失治理,保护良自然生态环境,增强生物水库和土壤水库的调蓄水能力。③多途径实施雨水资源化;湖南雨水资源丰沛,丘陵地形亦适合发展雨水资源化工作。因此,应做好山丘区山塘清淤扩容和防渗工作,增加雨水调蓄量;采用适当的集流技术,提高集水效率;实行庭院雨水集流贮存利用,解决山丘区人畜饮水困难和发展庭院经济。

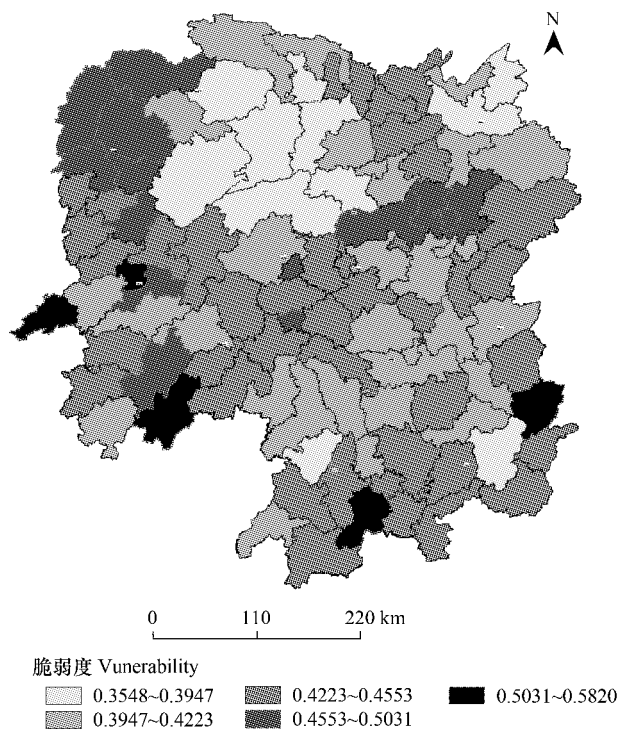


图 2 湖南省水资源生态库脆弱度图
Fig. 2 Ecological water resource bank vulnerability in Hunan province

References:

- [1] Wang X Q. A study on regional difference of fresh water resources shortage in China. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(6) : 516 — 520.
- [2] Pan X Y, Xia J. Applied Study on Evaluation Method for Water Resources Carrying Capacity Based on GIS Techniques in Typical North District. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(4) : 664 — 671.
- [3] Li J L, Zhao H B. Effects of Wetlands Changes on Eco-Environmental Water Requirement in Liaohe Delta. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 20(2) : 129 — 134.
- [4] Shen D J, Liu Bin, Guo M R. Supply-decided water deployment: a case study of Hailaer River basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(11) : 1398 — 1404.
- [5] Meng X M, Shu L C, Lu Y R. Modified DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment based on entropy weight. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(1) : 94 — 99.
- [6] Wu S F, Lu i Z H, Han P. Impact of Climate Change on Water Resources of the Uriimqi River Basin. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5) : 703 — 706.
- [7] Xie X L, Wang K R. Equilibrium and Management of Water Resources in Hilly Area Around Dongting Lake. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(4) : 92 — 95.
- [8] Zhang b, Zhang T L. Cause of seasonal draught formation and strategy of the eastern hills in southern China. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(4) : 413 — 419.
- [9] Wang M Z. Study on Seasonal Drought in Southern China. *Rural Eco-Environment*, 1997, 13(2) : 6 — 10.
- [10] Chen Z F, Zhang X X. Effect of seasonal draught on forestry and fruit industry at red soil region in southern China. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(3) : 241 — 244.
- [11] Huang D Y, Wang K L, Huang M. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11) : 2516 — 2523.
- [12] Xie X L. Study on surface water transport in agricultural landscape on the slop lands of red soil (dry season). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(4) : 55 — 58.
- [13] Duan H P, Bian X M, Xie X L. Water transport through interface between land and atmosphere in dry season on red soil slopes. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3) : 457 — 463.
- [14] Wang X Y, Chen H S, Wang K L. Spatio-Temporal Dynamic Change of Soil Water in Sloping Land with Different Use Modes in Red Soil Region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3) : 110 — 113.
- [15] Peng N, Xie X L, Wang K F. Study on Rainfall Infiltration, Runoff and Soil Water Redistribution on Sloping Lands of Red Soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3) : 17 — 20.
- [16] Xie X L, WANG K R. Experimental Study on Engineering Storage and Allocation of Rain water in Subtropical Hilly Area. *Research of Agricultural Modernization*, 2000, 21(3) : 143 — 146.
- [17] Zhu Q Y. Water resource exploitation and protection in Hunan Province. *Hunan Hydraulic and Water Electricity*, 2007, (2) : 53 — 55.
- [18] Hong Y P. Study on water resource management in Yangtze basin. *Yangtze River*, 1999, 30(5) : 15 — 17.
- [19] Zou J. Study on Comprehensive Evaluation of Sustainable Utilization of Water Resource in Hunan Province. *Water Saving Irrigation*, 2007, (2) : 18 — 21.
- [20] Li J B, Lu C Z, Liang C J. Study on water security problem in Hunan Province. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 34(7) : 52 — 57.
- [21] Li J B, Wang K L, Zhu ning. Flood and drought disaster and regulation of storm-runoff resources in Hunan Province. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(6) : 716 — 724.
- [22] Yang Y S, Wang M Z. Study on Restoration of Water-ecological Reservoir in South China. *Research of Soil and Water Conservation*, 2000, 7(3) : 131 — 133.
- [23] Wang X D, Zhong H X. Approaches to Concept of Vulnerability of Ecology and Environment. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(6) : 21 — 25.
- [24] Dixon B. Groundwater vulnerability mapping: A GIS and fuzzy rule based integrated tool . *Applied Geography*, 25 (2005) 327 - 347.
- [25] Birkmann J. eds. *Measuring Vulnerability to Hazards of National Origin*. Tokyo: UNU Press, 2006.
- [26] Liu L L. Concept and quantitative assessment of vulnerability of water resource. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2002, 22(2) : 41 — 44.
- [27] He F H, Huang M B, Li J B. Role of soil water reservoirs and forests in regulating water resources. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, 10(1) : 42 — 44.
- [28] Pan F, Liang C, Wang Z L. Fuzzy matter-element model for evaluating sustainable utilization of regional water resources. *Advances in Water Science*, 2003, 14(3) : 271 — 275.

- [29] Yang Z R, Zhang W M. Distribution law in time and space of historical drought of Hunan Province. *Journal of Catastrophology*, 1994, 9(6): 32-37.
- [30] Li J B, Zheng Y Y, Gao C H. A discussion on geographical regularity of flood and drought in Hunan Province. *Journal of Natural Disasters*, 2000, 9(4): 115-120.
- [31] Zuo L F, Qiu C X. The characteristics drought and influence on economy in hunan. *Economic Geography*, 2000, 20(3): 36-39.

参考文献:

- [1] 王晓青. 中国水资源短缺地域差异研究. *自然资源学报*, 2001, 16(6): 516-520.
- [2] 潘兴瑶, 夏军. 基于 GIS 的北方典型区水资源承载力研究. *自然资源学报*, 2007, 22(4): 664-671.
- [3] 李加林, 赵寒冰. 辽河三角洲湿地生态环境需水量变化研究. *水土保持学报*, 2005, 20(2): 129-134.
- [4] 沈大军, 刘斌, 郭鸣荣. 以供定需的水资源配置研究. *水利学报*, 2006, 37(11): 1398-1404.
- [5] 孟宪萌, 束龙仓, 卢耀如. 基于熵权的改进 DRASTIC 模型在地下水脆弱性评价中的应用. *水利学报*, 2007, 38(1): 94-99.
- [6] 吴素芬, 刘志辉, 韩萍. 气候变化对乌鲁木齐河流域水资源的影响. *冰川冻土*, 2006, 28(5): 703-706.
- [7] 谢小立, 王凯荣. 环洞庭湖丘岗地区水资源平衡及其管理. *水土保持学报*, 2001, 15(4): 92-95.
- [8] 张斌, 张桃林. 南方东部丘陵区季节性干旱成因及其对策研究. *生态学报*, 1995, 15(4): 413-419.
- [9] 王明珠. 我国南方季节性干旱研究. *农村生态环境*, 1997, 13(2): 6-10.
- [10] 陈正法, 张茜茜. 我国南方红壤区季节性干旱及对林果业的影响. *农业环境保护*, 2002, 21(3): 241-244.
- [11] 黄道友, 王克林, 黄敏. 我国中亚热带典型红壤丘陵区季节性干旱. *生态学报*, 2004, 24(11): 2516-2523.
- [12] 谢小立. 红壤坡地农业景观(旱季)地表界面水分传输研究. *中国生态农业学报*, 2003, 11(4): 55-58.
- [13] 段华平, 卞新民, 谢小立. 红壤坡地干旱季节地表-大气界面水分传输. *生态学报*, 2004, 24(3): 457-463.
- [14] 王晓燕, 陈洪松, 王克林. 不同利用方式下红壤坡地土壤水分时空动态变化规律研究. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 110-113.
- [15] 彭娜, 谢小立, 王开峰. 红壤坡地降雨入渗、产流及土壤水分分配规律研究. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 17-20.
- [16] 谢小立, 王凯荣. 亚热带丘岗区雨水工程蓄调实验研究. *农业现代化研究*, 2000, 21(3): 143-146.
- [17] 朱青云. 湖南省水资源开发利用与保护对策研究. *湖南水利水电*, 2007, (2): 53-55.
- [18] 洪一平. 长江流域可持续发展的水管理浅议. *人民长江*, 1999, 30(5): 15-17.
- [19] 邹君. 湖南省水资源可持续利用综合评价研究. *节水灌溉*, 2007, (2): 18-21.
- [20] 李景保, 卢承志, 梁成军. 湖南省水安全问题研究. *水利学报*, 2003, 34(7): 52-57.
- [21] 李景保, 王克林, 朱宁. 湖南省水旱灾害与暴雨径流资源的调控. *自然资源学报*, 2004, 19(6): 716-724.
- [22] 杨艳生, 王明珠. 南方水土流失区生态水资源库恢复重建研究. *水土保持研究*, 2000, 7(3): 131-133.
- [23] 王小丹, 钟祥浩. 生态环境脆弱性概念若干问题探讨. *山地学报*, 2003, 21(6): 21-25.
- [26] 刘绿柳. 水资源脆弱性及其定量评价. *水土保持通报*, 2002, 22(2): 41-44.
- [27] 何福红, 黄明斌, 李景保. 土壤水库和森林植被对水资源的调节作用. *土壤与环境*, 2001, 10(1): 42-44.
- [28] 潘峰, 梁川, 王志良. 模糊物元模型在区域水资源可持续利用综合评价中的应用. *水科学进展*, 2003, 14(3): 271-275.
- [29] 杨志荣, 张万敏. 湖南省历史旱灾时空分布规律. *灾害学*, 1994, 9(6): 32-37.
- [30] 李景保, 郑云友, 高昌海. 论湖南省水旱灾害的地理规律性. *自然灾害学报*, 2000, 9(4): 115-120.
- [31] 左利芳, 仇财兴. 湖南干旱特征及其对经济的影响. *经济地理*, 2000, 20(3): 36-39.