

# 水资源安全问题研究综述

郭 梅, 许振成, 彭晓春

( 国家环境保护总局华南环境科学研究所, 广东 广州 510655 )

**摘要** 综述水资源安全的定义、水资源安全的度量和水资源安全对策。主要内容包括 : 水资源安全度量指标 ( 水资源压力指数、水资源承载力、社会化水资源稀缺指数、水贫困指数 ) 的运用及其优缺点 ; 水资源安全对策 ( 水资源的安全管理与安全保障 ) 研究概况。认为在以下方面仍需加强研究 : 完善水环境安全概念 , 定量评价社会经济系统对水资源安全的影响 , 实现水资源最佳配置 , 运用虚拟水战略实现我国或我国局部地区水资源安全等。

**关键词** 水资源安全 ; 安全度量 ; 安全对策 ; 虚拟水贸易

中图分类号 : X22 文献标识码 : A 文章编号 : 1004-693X(2007)03-0040-04

## Progress in water security

GUO Mei, XU Zhen-cheng, PENG Xiao-chun

( South China Research Institute of Environment Science, National Bureau of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China )

**Abstract** The study on the water security research includes the definition, measurement, and countermeasures. The application of indices for security measurement, such as the water resources pressure index, the water resources carrying capacity, the index of socialization of water resources scarcity and water poverty index, and their advantages and disadvantages were discussed. The countermeasures of water resources security were summarized and main measures for the water security were put forward, including perfect of the concept of water environmental security, quantitative analysis of the influence of social economic system on water security, optimal allocation of water resources and system, and virtual water strategy.

**Key words** water security; measurement of security; countermeasures for security; virtual water trade

水资源既是基础性的自然资源,也是战略性的经济资源和社会资源,因此,水资源安全不仅是生态环境问题,也是关系到国家安全的经济问题、社会问题和政治问题。随着国民经济的发展,水资源正在成为一种稀缺资源,水资源安全问题也越来越受到人们的关注,并成为研究的热点。

水资源安全的研究领域主要有 : 水资源安全的定义,水资源安全的度量和水资源安全对策等方面<sup>[1]</sup>。本文将分别从以上 3 个方面对水资源安全的研究进展进行综述。

### 1 水资源安全的含义

2000 年在海牙召开的第二届世界水论坛会议

上,将水资源安全定义为“以可承受的价格获取足够安全的水”。陈德敏等<sup>[2]</sup>在此基础上对水资源安全的定义进行了延伸,认为水资源安全是指一定时空条件下的人类于生存和发展中可以持续、稳定、及时、足量和经济地获取所需水资源的状态。根据此定义,赵军凯等<sup>[3]</sup>认为水资源安全内涵包括水质安全和水量安全,其中水质安全是水资源安全的第一个层次,也是最重要的层次。水量安全主要是指基于供求关系和生态需求的水量安全,供求关系的水量安全要求水供给能力略大于水需求能力。他特别指出,为了保证水资源环境(水资源得以涵养、蓄积的空间)和水资源生态系统的安全,提供和支持水资源的生态系统的最低需水量即生态需水量应得到保证,人类不能过多挤占

生态用水而使生态系统崩溃 因此人类必须树立水资源可持续利用的概念 即对水资源的利用量不能超过水的再生补充量。王渺林等<sup>[4]</sup>进一步指出水资源安全问题的内涵和外延 其内涵包括两个方面:一个是水资源安全的自然属性 即干旱、洪涝、河流改道等自然型的水安全;另一个是水资源安全的社会属性 由于人类对自然水循环的大量干预所形成的二元水循环模式导致了水资源安全在具有自然属性的同时还具有社会属性 如水量短缺、水质污染、水环境破坏、水生态系统功能丧失、水分配不公、水资源浪费、水管理混乱等。水资源安全的外延指的是由水资源安全引发的其他安全问题 如粮食安全、经济安全和社会政治稳定及国家安全等。

综述上述定义 可以认为水资源安全实际上涉及社会安全、经济安全和生态安全等方面的问题 其本质是水资源供给能否满足合理的水资源需求 其范畴应包括水质安全、水量安全和水生态环境安全。

## 2 水资源安全的度量

### 2.1 水资源压力指数

1989年 Falkenmark<sup>[5]</sup>定义人均水资源量(指人均拥有的可更新淡水资源)为水资源压力指数(Water Scarcity Index,  $I_{WS}$ ),以度量区域水资源稀缺程度 并确定了水资源压力的临界条件为:当  $I_{WS}$  小于  $1700 \text{ m}^3/\text{a}$  时,为有水资源压力(Water Resources Stress);当  $I_{WS}$  小于  $1000 \text{ m}^3/\text{a}$  时,出现慢性水资源短缺(Chronic Water Scarcity);而当  $I_{WS}$  小于  $500 \text{ m}^3/\text{a}$  时即为水资源极度紧缺(Absolute Water Scarcity)。自此之后,该水资源压力指数及水文水资源压力指数(Hydrological Water Scarcity Index,  $I_{HWS}$ ,指  $1 \text{ 万 m}^3$  水资源所支撑的人口数,是  $I_{WS}$  的变通形式)得到了广泛的应用<sup>[6-7]</sup>。实际上  $I_{WS}$  反映的是一种绝对水资源压力,用它来度量水资源稀缺程度的不足之处有:首先它只考虑了水资源的供给却没考虑社会经济系统对水资源需求的影响,事实上由于气候、产业结构以及生活方式等因素的影响,不同地区的人均水资源需求量也不尽相同,因此,人均水资源量供给相同的地区,可能缺水程度很不相同。另外,在计算水资源供给时也没考虑水资源的时空分布条件及水资源开发的难易程度对水资源供给的影响<sup>[8]</sup>。

### 2.2 水资源承载力

夏军<sup>[9]</sup>认为水资源承载力是水资源安全的基本度量。水资源承载力是指在一定的水资源开发利用阶段,满足生态需水的可利用水量能够维系有限发展目标的最大的社会—经济规模。通常可用水资源承载力的供需平衡指数( $I_{WSD}$ )来进行度量,  $I_{WSD}$  的

计算公式可表达为:

$$I_{WSD} = W_s - W_D$$

式中:  $W_s$  为可利用水资源量,可以通过可更新恢复的地表水与地下水资源总量加上境外调水扣除生态需水量加以估算,  $W_D$  为水资源需求总量,包括生活需水、工业需水、农业需水和环境及其他用水。

当  $I_{WSD} > 0$  时,说明一个国家或地区水资源足以承载这样的社会经济发展规模,即在小于或等于这样的社会经济发展规模条件下,其水资源是安全的;反之则不安全。从  $I_{WSD}$  的计算可知,用水资源承载力来度量水资源安全的实质是指在考虑了生态需水量后的水资源供需平衡,当供大于需时即为安全,当供小于需时则不安全。该方法的优点是考虑了生态需水量的影响,其缺点是没有考虑水质及水资源开发利用的难易程度对水资源供给的影响,另外,由于生态需水量的计算方法还不成熟,从而给该方法所用的度量指数  $I_{WSD}$  的计算带来了一定的困难。

### 2.3 社会化水资源稀缺指数

事实上一个国家或地区解决水资源稀缺以及由此带来的矛盾、冲突的能力即社会适应性能力(也称社会资源,并认为自然资源如水资源稀缺为第一类资源稀缺,社会资源稀缺为第二类资源稀缺)不同,在面对同样程度的水资源稀缺问题时所受到的社会影响是不一样的。为了反映社会适应能力对水资源稀缺的影响, B Appelgren 和 L Ohlsson<sup>[10-12]</sup>引入了社会化水资源稀缺指数(Social Water Scarcity Index,  $I_{SWS}$ ),一个国家或地区的  $I_{SWS}$  等于该国家或地区的  $I_{HWS}$  除以该区域的适应自然资源稀缺可调用的社会资源的数值即社会适应性能力,通常社会适应性能力的大小可以用“人文发展指数”(  $I_{HD}$  )来度量。因此,  $I_{SWS}$  的计算公式可以表达为

$$I_{SWS} = I_{HWS} / I_{HD}$$

式中:  $I_{HD}$  是联合国开发计划署用来度量一个国家或地区的可持续发展能力的,它由三项基础指标组成:①人均预期寿命,代表福利和发展状况;②教育水平,包括成人(15岁及其以上人口)识字率和综合入学率,代表制度能力;③人均GDP,代表经济增长状况<sup>[9]</sup>。

$I_{WS}$ 、 $I_{HWS}$  和  $I_{SWS}$  的评价标准见表 1。

表 1  $I_{WS}$ 、 $I_{HWS}$ 、 $I_{SWS}$  的划分标准

标准	$I_{WS}$	$I_{HWS}$	$I_{SWS}$
富余	> 1700	0 ~ 5	0 ~ 9
有压力	1700 ~ 1000	6 ~ 10	10 ~ 19
紧缺	1000 ~ 500	11 ~ 20	20 ~ 29
极度紧缺	< 500	> 20	> 30

注:为了方便比较, L Ohlsson 后来将  $I_{HWS}$  和  $I_{SWS}$  的划分标准统一调整为: 0 ~ 5 为相对富余; 6 ~ 10 为有压力; 11 ~ 20 为紧缺; > 20 为极度紧缺。

分指数	分指数的描述
资源	地表水和地下水的可利用性,包括水资源的变化、水质以及总的水资源量
途径	用水(包括饮用水、灌溉用水和工业用水)的难易程度;包括取水距离和家庭用水收集时间及其他因素
能力	对水资源的管理能力及管理效率,收入、教育水平和健康状况
利用	对水资源的利用方式,包括生活、农业和工业用水的方式
环境	对环境系统完整性的评估和对生态系统的价值及服务价值的评估

$I_{WP}$ 能很好地将水资源的自然属性与社会、经济因素对水资源的影响联系起来,为水资源管理提供必要的信息<sup>[16]</sup>。但到目前为止,采用水贫困指数来评价水资源安全的报道并不多,因此,该指数能否或是如果能的话又该如何用于水资源安全的度量还有待进一步研究。

### 3 水资源安全对策研究

#### 3.1 水资源安全管理

在一定的时间和空间范围内,可利用的水资源的数量总是有限的,因此,建立科学、有效的水资源管理体制以提高水资源的利用效率和配置效率被认为是实现水资源安全的根本途径<sup>[17-18]</sup>。但如何才能达到此目的呢?伍新木等<sup>[19-20]</sup>提出应进行制度创新(包括水权制度创新、管理体制创新和监管体制创新),闵庆文等<sup>[21]</sup>提出应实行生态系统管理。

伍新木等<sup>[19]</sup>认为,由于政府缺位造成水资源产权模糊、市场缺失造成水资源滥用以及计划失效造成水资源配置混乱是我国水资源浪费、水资源效益低下的根本原因,也是实现我国水资源安全的根本障碍,即制度障碍。因此,他认为进行制度创新是我国实现水资源安全的关键。其中水权制度创新主要是指要建立产权明晰、政资分开、权责明确、流转顺畅的水资源产权制度、灵活有效的政府配水和市场配水相结合的配水制度、多级市场制度和灵活多样的定价机制,管理体制创新主要是指应当实行政资、政企分开,立法监管分开,配水评价分开,实现水权分级所有但要统一管理,建立应急管理和常规管理,应对“大旱”、“大汛”进行特别管理,监管体制创新则包括完备的法律制度和科学的信息系统。宁立波等<sup>[20]</sup>认为由于水权制度建设的落后而引起的水权制度冲突是威胁我国水资源安全的根源,主要表现为由于水资源的权属冲突、管理体制冲突、取水许可制度与水权交易的冲突、收益分配权的冲突、“以人为本”原则与水资源承载力的冲突而造成的水资源

与  $I_{HWS}$  相比较,  $I_{SWS}$  的优越性在于强调了人类在面对由于自然资源稀缺带来的压力时的主观能动性。随着人口的不断增加,人均水资源量会越来越少,根据水资源压力指数,随着时间的变化,人类的水资源压力会越来越大,水资源安全也就变得越来越不安全了,而实际上随着人类社会对水资源管理能力的提高,并不是所有国家的水资源都会变得越来越不安全,因此,可以说水资源压力指数会夸大水资源的不安全程度。由于  $I_{SWS}$  评价标准的不确定性,它可以将不同国家或地区的水资源稀缺程度进行横向比较,但却不能定量反映一个国家的水资源稀缺程度或安全程度。

#### 2.4 水贫困指数

张翔等<sup>[14]</sup>曾尝试着将水贫困指数(Water Poverty Index,  $I_{WP}$ )用于海河流域的水安全评价。 $I_{WP}$ 是由英国生态与水文中心提出的一种新的水管理工具,该指数由资源(Resource)、途径(Access)、能力(Capacity)、利用(Use)和环境(Environment)5个分指数组成,  $I_{WP}$ 及5个分指数的取值范围为0~100,指数取值越大表示状况越好,5个分指数的具体内容见表2<sup>[15]</sup>。

$I_{WP}$ 的计算公式如下:

$$I_{WP} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i x_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$$

式中:  $w_i$  为  $I_{WP}$  分指数  $x_i$  的权重;  $x_i$  为相应地区第  $i$  项分指数;  $i = 1, 2, \dots, 5$ , 分别代表资源、途径、能力、利用和环境。

的滥采滥用、水资源的低效配置和低效利用等。因此,他认为进行水权制度创新是解决水资源安全问题的有效途径,其主要内容包括建立明晰的产权制度、取水许可制度,建立水权交易市场和实行政府指导下的水价市场形成机制。

闵庆文等<sup>[21]</sup>则在分析了西北地区水资源安全的生态学原因后,提出了西北地区确保水资源安全的生态系统途径。主要包括:建立以流域为单元的水资源生态系统管理模式;充分利用市场机制,完善水资源管理模式;以水资源承载力和水资源安全为基础,进行西北地区的生态环境建设,加强水生态环境管理,避免因水污染造成更加严重的水危机。他同时也指出,这些虽然是针对西北干旱提出的水资源安全对策,但对我国其他地区也有借鉴作用。

### 3.2 水资源安全保障

陈德敏等<sup>[2]</sup>分析了我国水资源安全国际、国内法律保障及存在的主要问题,并提出了完善我国水资源安全法律保障的对策。他认为在国际法律保障方面,我国需要加强国际水法对维护我国水资源安全特别是跨境共享水资源安全的作用的认识,认真研究国际水法的影响因素、基本原则以及国际水法与跨境共享水资源开发利用与安全维护之间的关系,建立健全我国水资源安全国际法制的建设。在国内法律保障方面,则需要树立水资源安全意识和水资源安全法制意识,研究制定一系列维护我国水资源安全的专门的法律、法规,以完善我国水资源安全的法律保障体系;建立水资源安全公益诉讼制度,以保护公民的水资源安全权。

郑通汉<sup>[22]</sup>认为建立水资源安全预警系统可以提前发现未来有关水资源可能出现的不安全问题及其成因,为制定消除或缓解水资源不安全的措施提供依据,是保障水资源安全的有效途径。窦明等<sup>[23-25]</sup>分别对汉江、辽河流域和广西桂江的水质预警预报信息系统的应用软件进行了研究,并研制了相应的信息系统。他们所研制的水质预警系统虽然与水资源安全信息系统还有差距,但水质安全也是水资源安全的重要内容之一,因此,他们的研究对水资源安全信息系统的建设和发展具有重要意义。

### 3.3 水资源安全新思路——虚拟水贸易

虚拟水(virtual water)<sup>[26]</sup>是指生产商品和服务所需要的水资源数量,相对于实体水来说,它是“虚拟”的,因此称为虚拟水,虚拟水贸易是指缺水国家或地区通过贸易的方式从富水国家或地区购买水密集型农产品(粮食)来实现本地区水和粮食的安全,如水资源稀缺的一些中东国家每年进口的虚拟水的量相当于尼罗河的径流量<sup>[27]</sup>。通过虚拟水贸易,不但可以

避免长距离调水或运输水的高投入,而且可以实现水资源在更大尺度范围的再分配,克服水资源分布不均的缺陷,并能提高水资源的产出效益。如巨大的水资源供需矛盾的存在使中东地区解决粮食安全只能另辟蹊径。目前,中东国家每年通过贸易方式进口的虚拟水量已经相当于中东地区所有可用淡水水量的25%,虚拟水贸易使面临严峻水赤字的中东国家不用任何政治成本就解决了缺水问题。另外,通过虚拟水的计算,还可以使人们知道消费物品中包含的水资源的量,从而有助于提高人们的节水意识,使人们自觉选择更利于水资源节约的生活、生产方式。

在我国,程国栋<sup>[27]</sup>是最早将虚拟水贸易引入水资源安全领域的,他分析总结了典型国家或地区的虚拟水贸易情况<sup>[28]</sup>,并对我国西北5省(区)的2000年的虚拟水的量进行了初步测算<sup>[28-29]</sup>。他认为我国西北地区完全可以运用虚拟水战略,从国内农业生产条件较好、粮食生产富足的省份进口粮食,减少本地的粮食生产以及由粮食生产带来的水资源短缺压力和生态压力,实现区域水资源的可持续利用,保障西北地区乃至全国的生态安全。王新华等<sup>[30]</sup>也指出我国水资源空间分布严重不均,南多北少、东多西少,这为进行区域虚拟水贸易创造了条件,通过区域虚拟水贸易,合理安排种植结构和产业布局,对促进水资源在全国范围内合理配置具有重要的战略意义。

## 4 需进一步研究的方面

在水资源安全研究方面虽然已取得了很多进展,但由于水资源安全的复杂性,到目前为止仍然有以下一些难点问题需要学者们继续探讨和研究。

a. 水环境生态安全的概念有待完善。水环境生态安全是水资源安全的一个重要方面,但目前对于水环境生态安全的研究仅停留在生态需水量的计算上,是不是保证了最低生态需水量就一定能实现水生态环境的安全还有待进一步研究。

b. 水资源安全除了与水源的自然属性有关外,还与社会经济系统密切相关,如何定量评价社会经济系统对水资源安全的影响以及如何在社会经济环境巨系统中实现水资源的最佳配置效益尚需深入研究。

c. 水资源有偿使用以及建立在该基础之上的水权交易制度和交易市场是保障水资源安全的经济手段,很多学者和专家也已充分论证了建立水权交易制度及水权交易市场的必要性,但对建立水权交易制度及水权交易市场的操作实践缺乏深入研究。

(下转第51页)

0.537 拟合精度仅略差于前一模型。如已知 2001 年的岩溶水计划开采量,根据该模型即可获得 2001 年的辛安泉流量预测值。假定 2001 年的岩溶水计划开采量与 2000 年的岩溶水实际开采量相同,由此预测 2001 年辛安泉的流量为  $4.907 \text{ m}^3/\text{s}$ ,预测结果与当年的实际观测结果非常接近,该模型可以为日后合理开发辛安泉提供依据。

## 参考文献:

- [1] 韩行瑞,鲁荣安,李庆松,等.岩溶水系统——山西岩溶大泉研究[M].北京:地质出版社,1993:151.
- [2] 马腾,王焰新,邓安利,等.岩溶水系统演化与全球变化研究——以山西为例[M].武汉:中国地质大学出版社,2005:81-85.

(收稿日期 2005-11-17 编辑 舒建)

(上接第 43 页)

d. 虚拟水贸易是实现区域水资源安全、提高水资源利用效率的有效工具,必须运用虚拟水的新概念,创新水资源安全战略的管理体制与机制,建立全球化的国家水资源安全新战略。但我国对虚拟水的研究起步较晚,如何使虚拟水的计算更符合我国的实际生产情况以及如何运用虚拟水战略实现我国或局部地区的水资源安全等都需要进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 夏军,朱一中.水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J].自然资源学报,2002,17(3):262-269.
- [2] 陈德敏,乔兴旺.中国水资源安全法律保障初步研究[J].现代法学,2003,25(5):118-121.
- [3] 赵军凯,赵秉栋,冷传明.中国水资源安全与可持续利用[J].南阳师范学院学报:自然科学版,2004,3(3):67-70.
- [4] 王渺琳,刘春德,易瑜.岷江流域水资源安全问题[EB/OL].[2004-08-30].<http://www.hwcc.com.cn/newsdisplay>.
- [5] FALKEMARK M. The massive water scarcity now threatening africa-why isn't it being addressed[J]. Ambio,1989,18(2):112-118.
- [6] POSTEL S. Last oasis: facing water scarcity[M]. The Worldwatch Environmental Alert Series, New York: W. W. Norton & Co. 1992.
- [7] RASKINS P G, KIRSHEN P. Water futures: assessment of long-range patterns and problems[C]//Background Document for Chapter 3 of the Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World. Boston: Stockholm Environment Institute, 1997.
- [8] 贾绍凤,张军岩,张士锋.区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系[J].地理科学进展,2002,21(6):538-545.
- [9] 夏军.水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战(一)[J].海河水利,2002(2):5-8.
- [10] APPELGERN B, OHLSSON L. Social resource scarcity: a critical factor in the Nile Basine[C]//Conference paper prepared for Nile 2002. Kigali, 1998: 22-27.
- [11] APPELGERN B, KLOHN W. Management of water scarcity: a focus on social capacities and options[J]. Physical Chemistry Earth (B), 1999, 24(4): 361-373.
- [12] OHLSSON L. Water conflicts and social resource scarcity[J].

Physical Chemistry Earth (B) 2000, 25(3): 213-220.

- [13] 徐中民,龙爱华.中国社会化水资源稀缺评价[J].地理学报,2004,59(6):982-984.
- [14] 张翔,夏军,贾绍凤.水安全定义及评价指数的应用[J].资源科学,2005,27(3):145-149.
- [15] STEVEN D M, CAROLINE S, JEREMY M. Water poverty index: a tool for integrated water management[C]//3rd WaterNet/Warfsa Symposium "Water Demand Management for Sustainable Development". Dares Salaam, 2002.
- [16] CARDINE S. Calculating a water poverty index[J]. World Development, 2002, 30(7): 1195-1210.
- [17] 姜文来.中国 21 世纪水资源安全对策研究[J].水科学进展,2001,12(1):66-71.
- [18] 贾绍凤,何希吾,夏军.中国水资源安全问题及对策[J].中国科学院院刊,2004,19(5):347-351.
- [19] 伍新木,李雪松.保障水资源安全的关键是制度创新[EB/OL].[2004-08-18].<http://www.gmw.cn>.
- [20] 宁立波,肖春娥.水权制度冲突与水资源安全[J].地理与地理信息科学,2004,20(3):61-63.
- [21] 闵庆文,于贵瑞,余卫东.西北地区水资源安全的生态系统途径[J].水土保持研究,2003,10(4):272-307.
- [22] 郑通汉.论水资源安全与水资源安全预警[J].中国水利,2003(11):19-22.
- [23] 龚明,李重荣,王陶.汉江水质预警系统研究[J].人民长江,2002,33(11):38-42.
- [24] 李秉文,刘明,冯明祥.辽河流域水质预警预报系统的探讨[J].东北水利水电,2000,18(9):39-42.
- [25] 陈惠君,唐允吉,吴贵彬.广西桂江水质预警预报信息系统的研究[J].陕西水力发电,1997,12(2):50-52.
- [26] ALLAN J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible [C]//Priorities for Water Resources Allocation and Management. London: ODA, 1993: 13-26.
- [27] 程国栋.虚拟水:水资源安全与水安全研究的创新领域[EB/OL].[2006-05-29].<http://www.studa.net/shuili/060529/17234022.html>.
- [28] 张志强,程国栋.虚拟水、虚拟水贸易与水资源安全新战略[J].资源环境,2004(3):7-10.
- [29] 程国栋.虚拟水——中国水资源安全战略的新思想[J].中国科学院院刊,2003(4):260-265.
- [30] 王新华.中部四省虚拟水贸易的初步研究[J].华南农业大学学报:社会科学版,2004,3(3):33-38.

(收稿日期 2005-10-10 编辑 徐娟)