



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.03.028

李雪松, 李婷婷. 中国水安全综合评价与实证研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 162-168. LI Xue song, LI Ting-ting. China's water security comprehensive evaluation and empirical analysis[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 162-168. (in Chinese)

中国水安全综合评价与实证研究

李雪松^{1,2}, 李婷婷¹

(1. 武汉大学 经济与管理学院, 武汉 430072; 2. 武汉大学 水研究院, 武汉 430072)

摘要: 水安全事关群众切身利益, 牵系国家可持续发展。基于水安全的内涵, 提出了水安全综合评价模型, 模型中构建了包含水健康安全、水发展安全和水保障安全 3 个准则层在内的 4 层次 48 个指标的水安全评价指标体系, 使用熵权法确定各个指标的权重并给出了评价公式。最后利用 2000 年-2014 年中国的相关数据, 对中国 2000 年-2014 年间的水安全发展做出了评价, 结果表明研究期间水健康安全基本上呈波动上升趋势, 水发展安全呈平缓上升趋势, 水保障安全则以较快的速度得到了改善, 但仍未达到最优的水安全标准, 水安全建设任务亟需继续大力推进。

关键词: 水安全; 评价指标体系; 熵权法; 指标权重; 中国

中图分类号: X820.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)03-0162-07

China's water security comprehensive evaluation and empirical analysis

LI Xue song^{1,2}, LI Ting ting¹

(1. School of Economic and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Institute of Water Research, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Water security is related to the vital interests of the masses, and has great influences on country's sustainable development. A water security comprehensive evaluation model was constructed in this paper. This model established an evaluation index system of water security, which included 4 levels, employed 3 criteria levels (water health security, water development security and water guarantee security) and had 48 indicators. With the entropy weight method, the weight of each index was determined. And the formula for water security index was also given in the model. Furthermore, using the macroscopical data from 2000 to 2014, this paper applied the water security evaluation model to assess the water security situation of China. The results showed that during the study period, water health security showed a fluctuant increasing trend, water development security presented a slowly rising trend and water guarantee security was improved at a rapid speed. However, it still did not reach the best standard of water security, and further efforts were still required to improve China's water security.

Key words: water security; evaluation index system; entropy weight method; index weight; China

在当今世界水资源短缺的严峻形势下, 确保水安全已经成为一个世界性的议题。不同的学者看待水安全的着眼点不尽相同, 第一类观点侧重于人类

需求, 主张水资源的供需平衡, 认为水安全是指存在足量合格且价格合理的水资源, 能够满足家户、社区或国家的健康安全、福利水平和生产能力等短期和

收稿日期: 2015-12-18 修回日期: 2016-04-07 网络出版时间: 2016-05-05

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160505.1129.013.html>

基金项目: 国家社会科学基金项目(10BJY064); 教育部人文社会科学规划项目(09YJA790159)

Fund: Project of the National Social Science Found of China(10BJY064); The Humanities and Social Science Planning Project of the Ministry of Education(09YJA790159)

作者简介: 李雪松(1974), 男, 湖北襄阳人, 副教授, 博士, 主要从事环境经济和区域可持续发展方面的研究。E-mail: xuesong7401@263.net

通讯作者: 李婷婷(1992-), 女, 湖南娄底人, 主要从事环境经济方面的研究。E-mail: litt2012@126.com

长期需求的状态^[1+2]。第二类观点则将水资源的可持续性视为最重要的因素,主张水安全应该不仅要使人们都有能力获得必须的足量水并且免受水灾害的威胁,还要能保护生态系统,确保可持续发展^[3+4]。第三类观点关注水资源分配机制的公平性或用水权利的保障,认为人们具有获得所需的足量水的权利,现行的水资源分配规则能够保障这一权利才能谓之水安全^[5+6]。第四类观点则将重点放在水资源的可得性上,认为水安全是指人人都能以可承受的价格获得足量的水来满足日常需求^[7+8];第五类观点侧重于水给人类带来的危害,认为水安全在于保护脆弱的水系统,避免洪涝干旱等水灾害带来的危害,保障水体功能和服务正常运转^[9+10]。综上可知,水安全并非单一的概念,而是一个涉及社会、经济、生态、环境等诸多方面的复杂系统,本文概括性地认为,水安全是指存在健康的自然水资源并能够与社会经济良性互动,既不给经济社会带来危害以满足其正常发展的需求,又能实现自身公平合理的配置和可持续发展的状态。

基于水安全的广阔内涵,许多学者或者组织通过构建评价指标体系,借助多元化的统计分析方法研究了水安全评价问题。在评价指标体系的构建上,国外的研究突出了水安全中所包含的可持续发展内涵:加拿大政府的政策研究机构(PRI)提出了基于资源、生态系统健康、基础设施、人类健康和能力五个层次内容的水资源可持续发展评价体系CWSI^[11],得到了许多学者的推广和应用^[12]。SWRR(2010)^[13]也发布了一个包含400个社会、经济和环境方面指标的评价体系,此外,Kang(2011)^[14]构建了水资源可持续发展的评价模型(WRSEM)。国内研究所构建的评价指标体系则更注重水安全内涵的完整性,常常涉及社会经济、生态环境、生存保障、水资源价值、制度规则等多方面的因素,如左其亭等(2008)^[15]、傅春等(2015)^[16]的研究,但是在评价指标的选择上较之国外的研究数量较少。在评价方法上,现有研究用到的主要有主成分分析法^[17]、模糊评价法^[18]、集对分析法^[19]、层次分析法^[20]等,具有较大的选择空间。总的说来,与水安全评价相关的研究成果颇丰,但在具体的评价对象上仍存在拓展的空间,国内现有的评价主要是针对省、市或者流域,而对中国整体国家层面的水安全评价涉及较少。黄昌硕等(2010)^[21]有意研究中国的水资源和生态安全,但仍然是以省份为基础单位进行研究。李雪松和李婷婷(2015)^[22]构建了一个3层次39个指标的评价体系运用层次分析法对2000年-2012年中国整体的水安全状态进行了

评价,但该研究存在三个方面的不足:第一,评价指标体系缺乏一些重要的指标,尤其是定性指标完全没有涉及;第二,研究使用层次分析法来进行水安全评价,结果具有较大的主观性;第三,没有水安全评价的数值标准,因此缺乏比较的基础。考虑到这些不足,在进一步深入理解水安全内涵的基础上,本文将提出新的水安全综合评价模型,模型中将构建一个包含4个层次48个指标的评价指标体系,在扩充定量指标的基础上同时引入定性指标,在评价方法上则使用基于客观数据的熵权法^[23]来确定权重,并给出评价标准,最后使用2000年-2014年的数据对中国的水安全进行综合评价。

1 水安全综合评价模型

1.1 水安全评价指标体系

根据水安全内涵,在定性定量相结合、科学性、代表性等原则的指导下,本文构建了一个由目标层、准则层、分类层和指标层四个层次构成的水安全评价指标体系见表1。

(1)目标层。目标层是水安全系统最上层的一个总体目标,代表综合考量各个影响因素得来的水安全程度,反映了区域内水资源的存在、使用以及保护建设等方面的总体情况、总体状态和总体结果。

(2)准则层。准则层是目标层的有机组成部分,这里设立水健康安全、水发展安全和水保障安全三个准则层。其中,水健康安全是从水资源物理存在的角度来衡量水安全程度,即从水资源的自然属性出发,来考虑水资源是否处于充足、干净、且具有较强的自我修复和更新能力的自然状态;水发展安全是从水资源系统对经济社会系统产生何种作用的角度来衡量水安全程度,即水资源是否能够满足社会经济稳定发展的要求,不会阻碍其发展危害其稳定;水保障安全是从经济社会系统对水资源系统产生何种作用的角度来衡量水安全程度,即经济社会系统是否能够从科技、管理、意识等方面通过节水、政府管理、市场作用等手段来保障水资源系统可持续发展的状态。

(3)分类层。水安全系统涉及的因素众多,不能笼统地一言以蔽之,三个准则层分别包含着不同类别和属性的指标,因而设置了细分的指标类别。水健康安全指标分为水量、水质和水生态三类,分别表征自然水资源的数量、质量和其他影响水自然状态的生态环境因素;水发展安全指标分为社会发展和经济发展两类,分别考察水资源对社会发展的支撑和对经济发展的支撑作用;水保障安全指标分为科技保障、管理保障和意识保障三个类别。

表 1 水安全评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of water security

目标层 A	准则层 B	分类层 C	指标层 D	指标属性	
水健康安全 (WHS)	水量		人均水资源量 $X_1 / (\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1})$	正向	
			平均降水量 X_2 / mm	正向	
			地下水资源量 $X_3 / \text{亿 m}^3$	正向	
	水质		地表水资源量 $X_4 / \text{亿 m}^3$	正向	
			水污染事故次数 $X_5 / \text{次}$	逆向	
			化学需氧量排放量 $X_6 / \text{万 t}$	逆向	
			工业废水排放达标率 $X_7 (\%)$	逆向	
			水质符合和优于三类水的河长占总评价河长的比率 $X_8 (\%)$	正向	
			氨氮排放量 $X_9 / \text{万 t}$	逆向	
			废水排放总量 $X_{10} / \text{万 t}$	逆向	
			城市污水处理率 $X_{11} (\%)$	正向	
		水生态		森林覆盖率 $X_{12} (\%)$	正向
				城市人均公共绿地面积 X_{13} / m^2	正向
				自然保护区面积占辖区面积比重 $X_{14} (\%)$	正向
				水土流失治理面积 $X_{15} / 10^3 \text{ hm}^2$	正向
				生态用水率 $X_{16} (\%)$	正向
				湿地面积占国土面积比重 $X_{17} (\%)$	正向
		水发展安全 (WDS)	社会发展		环境污染治理投资总额占 GDP 比重 $X_{18} (\%)$
	供水总量 $X_{19} / \text{亿 m}^3$			正向	
	人均用水量 $X_{20} / (\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1})$			逆向	
	亩均用水量 $X_{21} / (\text{m}^3 \cdot \text{亩}^{-1})$			逆向	
	城市人口用水普及率 $X_{22} (\%)$			正向	
	水灾受灾面积 $X_{23} / 10^3 \text{ hm}^2$			逆向	
	旱灾受灾面积 $X_{24} / 10^3 \text{ hm}^2$			逆向	
	人口增长率 $X_{25} (\%)$			正向	
	城市化率 $X_{26} (\%)$			正向	
经济发展				人均 GDP $X_{27} / \text{元}$	正向
				有效灌溉面积 $X_{28} / 10^3 \text{ hm}^2$	正向
				人均粮食产量 X_{29} / kg	正向
			农村居民家庭人均年纯收入 $X_{30} / \text{元}$	正向	
			城镇家庭平均每人全年实际收入 $X_{31} / \text{元}$	正向	
			城镇家庭恩格尔系数 $X_{32} (\%)$	逆向	
水保障安全 (WGS)				农村家庭恩格尔系数 $X_{33} (\%)$	逆向
				洪水灾害损失率 $X_{34} (\%)$	逆向
				干旱灾害经济作物损失率 $X_{35} (\%)$	逆向
			工业用水重复利用率 $X_{36} (\%)$	正向	
	科技保障		万元 GDP 用水量 X_{37} / m^3	逆向	
			耗水率 $X_{38} (\%)$	逆向	
			堤防保护面积 $X_{39} / 10^3 \text{ hm}^2$	正向	
			治理工业废水设施数量 $X_{40} / \text{套}$	正向	
			全社会水利固定资产投资占 GDP 比重 $X_{41} (\%)$	正向	
			排水建设项目投资额 $X_{42} / 108 \text{ 元}$	正向	
管理保障		水法规建立及执行程度 X_{43}	正向		
		农村改水累计受益率 $X_{44} (\%)$	正向		
		城市年末供水管道长度 X_{45}	正向		
	意识保障		公众节水意识 X_{46}	正向	
		环保组织 $X_{47} / \text{个}$	正向		
		水安全教育发展 $X_{48} / \text{人}$	正向		

(4) 指标层。指标层是具体的量化指标,是连接水安全评价指标体系与实际评价的关键因素。在水安全评价指标体系中,三个准则层的每一个分类层下都包含了多个相应的具体特征指标。

1.2 指标权重的确定

指标权重的确定是水安全评价的关键,目前常用的确权方法可分为主观和客观两类,主观确权法有层次分析法、专家打分法等,客观确权法有因子分析法、熵权法等。与主观确权法相比较,客观确权法不受主观臆断的影响,具有真实客观的优点,其中,基于信息熵理论的熵权法凭借其简便的计算和可靠的结果在研究中得到了广泛的运用,本文也采用熵权法来确定水安全评价指标权重的大小。

1.3 水安全评价指数

水安全评价指标体系包含数十个指标,这些单指标值构成了评价的基础。其中,定量指标可以通过查找客观的原始数据获得,而定性指标则无现存数据可用。本文采用调查打分法获得必需的数据资料来对定性指标进行量化,首先按百分制划分若干个等级,并制定准则划分的细则;然后通过查找相关资料、咨询专家公众等群体以及广泛的调查获得数据,最后对所得数据进行量化。

水安全评价指标体系分别从水健康安全、水发展安全和水保障安全三个准则层来衡量水安全程度,对这些准则层单指标数值进行集成量化就形成了相应的水健康安全指数(WHSI)、水发展安全指数(WDSI)和水保障安全指数(WGSI),综合的水安全指数(WSI)则由各准则层指数加权得出,用来表征评价区域内的水安全程度。这里借鉴加拿大水资源可持续发展指数(CWSI),将各准则层安全指数和综合水安全指数的计算公式分别表示如下:

$$B_j = \frac{\sum_{i=1}^N w_j^i x_{ij}^*}{\sum_{i=1}^N w_j^i} \quad (1)$$

$$WSI = \sum_{j=1}^N w_j B_j \quad (2)$$

式中: B_j 表示各准则层的安全指数(WHSI、WDSI 和 WGSI),其值介于 0~1 之间; x_{ij}^* 代表准则层 j 中的 i 指标标准化数值; w_j^i 为其在所有指标中对应的权重; w_j 代表各准则层安全指数 B_j 所对应的权重; WSI 代表综合水安全指数,其值越大,则认为水资源处于越安全的状态。

1.4 水安全评价标准

为了对水安全的评价结果进行直观判断,需要确定水安全指数的评价标准。然而,目前并不存在

统一的水安全标准, 研究中采用比较多的方法是对综合价值按等值划分等级^[24]。本文沿用这一做法, 联系实际情况, 根据水安全指数的取值范围, 以 0.2 为间隔, 将水安全划分为安全、基本安全、一般、不安全和极不安全五个等级见表 2。

表 2 水安全评价等级划分

Tab.2 Classification of water security evaluation

水安全等级	划分标准
安全	$0.8 \leq WSI \leq 1$
基本安全	$0.6 \leq WSI < 0.8$
一般	$0.4 \leq WSI < 0.6$
不安全	$0.2 \leq WSI < 0.4$
极不安全	$0 \leq WSI < 0.2$

2 水安全综合评价实证分析

2.1 数据来源和处理

本文针对的是 2000 年- 2012 年的中国水安全为评价, 采用的数据来源于各年的《中国水资源公报》《中国水利发展公报》《中国水旱灾害公报》《中国环境状况公报》《中国环境统计年鉴》和中经网数据库。各价值指标数据都被换算为 2000 年的可比价格, 用线性趋势分析法处理了个别缺失值, 并用极差变化法将各指标数据进行标准化处理以消除指标量纲的差异。

2.2 权重确定

利用熵权法和相关数据对水安全评价指标体系

中各指标进行确权, 得到各层次指标权重见表 3-表 6。结果表明, 对水健康安全最为重要的前五个指标为森林覆盖率(X_{12})、环境污染治理投资总额占 GDP 比重(X_{18})、水污染事故次数(X_5)、城市污水处理率(X_{11})以及水质符合和优于三类水的河长占总评价河长的比率(X_8), 权重都达到了 0.07 以上, 这些指标多代表水质和水生态。事实上, 水量的多寡在很大程度上由自然决定, 是否拥有有效的水资源来满足发展需求, 水质和其他影响水质的生态因素才是关键。水发展安全与人口增长率(X_{25})、有效灌溉面积(X_{28})、人均 GDP(X_{27})、农村居民家庭人均年纯收入(X_{30})和人均用水量(X_{20})等指标的联系最为紧密, 其中经济发展指标较之社会发展指标更为重要。在水保障安全中, 环保组织(X_{47})、耗水率(X_{38})、治理工业废水设施数量(X_{40})、排水建设项目投资额(X_{42})和万元 GDP 用水量(X_{37})是权重最大的五个指标, 其中有四个归属于科技保障因素, 这说明发展水利科技是促使水安全持续改善的有效动力。对综合的水安全而言, 水健康安全、水发展安全和水保障安全的权重分别为 0.357 9、0.365 3 和 0.276 8, 这说明三个准则层系统对总的水安全具有几乎同等的重要性。总地来看, 对水安全贡献最大的十个指标分别为人口增长率(X_{25})、有效灌溉面积(X_{28})、人均 GDP(X_{27})、农村居民家庭人均年纯收入(X_{30})、环保组织(X_{47})、环境污染治理投资总额占 GDP 比重(X_{18})、耗水率(X_{38})、水污染事故次数(X_5)、城市污水处理率(X_{11})和人均用水量(X_{20})。

表 3 各指标对水健康安全贡献权重

Tab.3 Contribution weight of each index to the water health security

指标	权重	指标	权重	指标	权重	指标	权重	指标	权重	指标	权重
X_1	0.0434	X_4	0.0511	X_7	0.0302	X_{10}	0.0463	X_{13}	0.0478	X_{16}	0.0631
X_2	0.0665	X_5	0.0768	X_8	0.0716	X_{11}	0.0737	X_{14}	0.0218	X_{17}	0.0384
X_3	0.0576	X_6	0.0336	X_9	0.0351	X_{12}	0.1036	X_{15}	0.0596	X_{18}	0.0798

表 4 各指标对水发展安全贡献权重

Tab.4 Contribution weight of each index to the water development security

指标	权重	指标	权重	指标	权重	指标	权重	指标	权重	指标	权重
X_{19}	0.0446	X_{22}	0.0296	X_{25}	0.1127	X_{28}	0.1107	X_{31}	0.0659	X_{34}	0.0420
X_{20}	0.0718	X_{23}	0.0322	X_{26}	0.0523	X_{29}	0.0445	X_{32}	0.0297	X_{35}	0.0366
X_{21}	0.0534	X_{24}	0.0417	X_{27}	0.0964	X_{30}	0.0887	X_{33}	0.0474	—	—

表 5 各指标对水保障安全贡献权重

Tab.5 Contribution weight of each index to the water guarantee security

指标	权重	指标	权重	指标	权重	指标	权重	指标	权重
X_{36}	0.0551	X_{39}	0.0461	X_{42}	0.0908	X_{45}	0.0716	X_{48}	0.0643
X_{37}	0.0886	X_{40}	0.0930	X_{43}	0.0540	X_{46}	0.0705	—	—
X_{38}	0.1016	X_{41}	0.0735	X_{44}	0.0759	X_{47}	0.1150	—	—

表 6 各指标及准则层对综合水安全贡献权重

Tab. 6 Contribution weight of each index and criteria level to the comprehensive water security

指标	权重	指标	权重	指标	权重	指标	权重	指标	权重	指标	权重
X_1	0.0155	X_{10}	0.0166	X_{19}	0.0163	X_{28}	0.0404	X_{37}	0.0245	X_{46}	0.0195
X_2	0.0238	X_{11}	0.0264	X_{20}	0.0262	X_{29}	0.0163	X_{38}	0.0281	X_{47}	0.0318
X_3	0.0206	X_{12}	0.0371	X_{21}	0.0195	X_{30}	0.0324	X_{39}	0.0128	X_{48}	0.0178
X_4	0.0183	X_{13}	0.0171	X_{22}	0.0108	X_{31}	0.0241	X_{40}	0.0257	WHS	0.3579
X_5	0.0275	X_{14}	0.0078	X_{23}	0.0118	X_{32}	0.0109	X_{41}	0.0203	WDS	0.3653
X_6	0.0120	X_{15}	0.0213	X_{24}	0.0152	X_{33}	0.0173	X_{42}	0.0251	WGS	0.2768
X_7	0.0108	X_{16}	0.0226	X_{25}	0.0412	X_{34}	0.0153	X_{43}	0.0149	—	—
X_8	0.0256	X_{17}	0.0137	X_{26}	0.0191	X_{35}	0.0134	X_{44}	0.0210	—	—
X_9	0.0126	X_{18}	0.0286	X_{27}	0.0352	X_{36}	0.0153	X_{45}	0.0198	—	—

2.3 水安全综合评价结果

根据公式(1)和公式(2),使用我国 2000 年-2012 年的各指标标准化数据和对应权重计算水安全指数,得到准则层系统安全指数和综合水安全指数结果,见表 7 和图 1。分析可知:

水健康安全(WHS)呈波动上升趋势。从 2000 年-2014 年,水健康安全指数由 0.2587 上升为

0.6977,年均增长 12.12%,但是在 2003 年-2004、2006、2009 年、2013 年-2014 年有小幅下降趋势,而在 2011 年则出现了显著的下降,幅度达到 33.5%。这些高低变化没有明确的规律可循,是因为水健康安全主要表征水资源的自然属性,其水量等因素受自然不可控力的影响较大,这些波动多为自然随机性的体现;此外,对水健康安全系统内部各

表 7 综合水安全指数及各准则层系统安全指数

Tab. 7 Comprehensive water security index and the criteria level system security index

年份	WHS	增长率	WDS	增长率	WGS	增长率	WSI	增长率	安全等级
2000	0.2587		0.2139		0.1024		0.1991		极不安全
2001	0.3209	24.04%	0.2376	11.08%	0.0518	-49.43%	0.2160	8.49%	不安全
2002	0.4482	39.68%	0.2719	14.45%	0.1772	242.24%	0.3088	42.99%	不安全
2003	0.3881	-13.40%	0.2542	-6.51%	0.2517	42.03%	0.3015	-2.37%	不安全
2004	0.3599	-7.29%	0.3348	31.68%	0.3093	22.87%	0.3367	11.69%	不安全
2005	0.5039	40.02%	0.3479	3.94%	0.4351	40.67%	0.4279	27.08%	一般
2006	0.4506	-10.57%	0.3746	7.66%	0.4763	9.47%	0.4300	0.49%	一般
2007	0.5289	17.38%	0.4043	7.93%	0.5539	16.29%	0.4903	14.04%	一般
2008	0.6330	19.68%	0.4867	20.38%	0.6528	17.85%	0.5850	19.32%	一般
2009	0.5692	-10.07%	0.5014	3.02%	0.7294	11.72%	0.5888	0.64%	一般
2010	0.8641	51.80%	0.5228	4.28%	0.8274	13.45%	0.7293	23.87%	基本安全
2011	0.5746	-33.50%	0.6389	22.19%	0.9065	9.55%	0.6900	-5.39%	基本安全
2012	0.7996	39.16%	0.6818	6.72%	0.8756	-3.41%	0.7776	12.70%	基本安全
2013	0.7034	-12.03%	0.6516	-4.43%	0.8186	-6.51%	0.7163	-7.88%	基本安全
2014	0.6977	-0.81%	0.7270	11.58%	0.8702	6.31%	0.7561	5.56%	基本安全

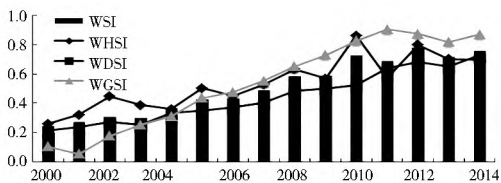


图 1 水安全综合指数及准则层系统指数历年值

Fig. 1 Comprehensive water security index and the criteria level system security index

指标的分析表明,期间的下降趋势主要是由于水量指标、水质符合和优于三类水的河长占总评价河长的比率和环境污染治理投资总额占 GDP 比重等的下降以及废水排放总量的增加所导致的,特别是在 2011 年,人均水资源量、平均降水量、地表和地下水资源量均为这 13 年来的最低水平,而氨氮排放量则为最高水平,环境污染治理投资也相对较低,水量的

显著降低与水质的恶化必然导致这一年水健康安全度大幅降低。

水发展安全(WDS)呈平缓上升趋势。除在2003年和2013年分别有6.51%和4.43%的略微下降外,其他年份都有所上升,平均增长率为17.13%,较为平稳。这一结果说明我国水资源对经济社会发展的支撑能力得到了稳步提高,虽然我国仍然面临着水多水少水不均水污染等一系列水安全问题,但这些问题对经济社会发展的威胁得到了有效的缓解。

水保障安全(WGS)呈快速上升趋势。从2000年-2014年,水保障安全的年均增长率高达53.56%,这与我国全社会水安全意识的提高以及水安全建设力度的加大息息相关。从2002年至2012年的十年中,修订了《中华人民共和国水法》等一批法律法规,共出台地方性涉水法律法规500余条;2012年全社会水利固定资产投资达到了4117.2亿元,环比增长19.27%;此外,民间组织活跃在环保领域,节水环保意识逐渐渗入公众的生产生活,水安全问题受到了广泛的关注(李雪松,李婷婷,2015)^[22]。这些事实促成了水保障安全的不断提高。

整体看来,我国水安全呈不断改善的良好趋势。按照评价标准,2000年我国水资源处于极不安全的状态,2001年-2004年虽然有所改善,但仍处于不安全的状态,此后的五年略有起色,一直处于不安全和基本安全之间的一般水平,直到2010年才达到基本安全的水平,在2011和2014年继续维持基本安全状态。这一结果得益于多种因素的共同作用,包括经济发展、水安全意识提高、水法规日益健全、科技发展等。不过在2000年-2014年间水安全度仍然没有达到安全(>0.8)的标准,增强我国水安全依然任重道远。

3 结论

根据上述分析可得出以下结论:(1)水健康、水发展和水保障安全对水安全系统的发展具有同等的重要性,人口增长率、有效灌溉面积、人均GDP、农村居民家庭人均年纯收入、环保组织、环境污染治理投资总额占GDP比重、耗水率、水污染事故次数、城市污水处理率和人均用水量是对水安全影响最大的十个指标。(2)在2000年-2014年的15年期间,中国的水安全呈不断改善的趋势,其中,水健康安全波动上升,水发展安全呈平稳增势,水保障安全则快速提高,说明中国的水资源在质量和数量上处于改善地位,对经济社会发展的支撑能力在逐渐上升,经

济社会对水安全的保障力度和能力也在不断增强。然而,直到2014年仍未达到最优的水安全标准。因此,我国水安全建设的任务仍需继续推进,力度还有待进一步加强。

参考文献(References):

- [1] Witter S G, Whiteford S. Water security: the issues and policy challenges[J]. *International Review of Comparative Public Policy*, 2000, (11): 1-25.
- [2] 贾绍凤, 王国, 夏军, 等. 社会经济系统水循环研究进展[J]. *地理学报*, 2003, 58(2): 255-262. (JIA Shaofeng, WANG Guo, XIA Jun, et al. Research progress in socio economic water cycle [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2003, 58(2): 255-262. (in Chinese))
- [3] Global Water Partnership. Towards water security: a framework for action [EB/OL]. [http://www.gwp.org/Global/ToolBox/References/Towards%20water%20security.%20A%20framework%20for%20action.%20Executive%20summary%20\(GWP,%202000\).pdf](http://www.gwp.org/Global/ToolBox/References/Towards%20water%20security.%20A%20framework%20for%20action.%20Executive%20summary%20(GWP,%202000).pdf), 2002.2.
- [4] 陈绍金. 水安全概念辨析[J]. *中国水利*, 2005(17): 13-15. (CHEN Shaolin. Analysis on the concept of water safety [J]. *China Water Resources*, 2005(17): 13-15. (in Chinese))
- [5] 联合国教科文组织国际水文计划中国国家委员会. 水安全人类的基本需要和权利(联合国秘书长科菲·安南在世界水日的献词)[J]. *水科学进展*, 2001, 12(2): 280. (National Commission for the UNESCO International Hydrological Programme of the United Nations in China. Water safety basic human needs and rights (UN Secretary General Kofi Annan in his message for world water day) [J]. *Advances in Water Science*, 2001, 12(2): 280. (in Chinese))
- [6] Tarlock A D, Wouters P. Reframing the water security dialogue[J]. *Journal of Water Law*, 2010, 20(2): 53-60.
- [7] 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): 118-120. (CHEN De min, QIAO Xing wang. A study of the legal protection of national water resource security in China [J]. *Modern Law Science*, 2003, 25(5): 118-120. (in Chinese))
- [8] Rijsberman F R. Water scarcity: fact or fiction[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 80(1): 5-22.
- [9] 郑通汉. 论水资源安全与水资源安全预警[J]. *中国水利*, 2003, 11(6): 19-22. (ZHEN Tong han. Discussion on water resource security and water resource security warning [J]. *China Water Resources*, 11(6): 19-22. (in Chinese))
- [10] UNESCO-IHE. Research Themes: Water Security[EB/OL]. <http://www.unesco-ih.org/Research/ResearchThemes/Water-security>. 2009.
- [11] GC PRI (Government of Canada, Policy Research Initiative). Canadian water sustainability index (CWSI): project report. [R]. GC PRI, Ottawa, Canada. 2007.
- [12] Attari J, Mojahedi S A. Water sustainability index: application of CWSI for Ahwaz County [A]. *World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers* [C]. ASCE, Re

- ston, V A, 2009: 1-7.
- [13] SWRR (Sustainable Water Resources Roundtable). Sustainable Water Resources Roundtable Report[R]. SWRR, 2010.
- [14] Kang M G, Lee G M. Multicriteria Evaluation of Water Resources Sustainability in the Context of Watershed Management[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2011, 47(4): 813-827.
- [15] 左其亨, 张云, 林平. 人水和谐评价指标及量化方法研究[J]. 水利学报, 2008, 39(4): 440-447. (ZUO Qiting, ZHANG Yun, LIN Ping. Index system and quantification method for human water harmony[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4): 440-447. (in Chinese))
- [16] 傅春, 占少贵, 章无恨. 南昌市水环境安全评价[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(3): 23-27. (FU Chun, ZHAN Shaogui, ZHANG Wu hen. Assessment of water environment security in Nanchang[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(3): 23-27. (in Chinese))
- [17] 施春红, 胡波. 城市供水安全综合评价探讨[J]. 资源科学, 2007, 29(3): 80-85. (SHI Chun hong, HU Bo. Synthetically evaluating the security of urban water supply[J]. Resources Sciences, 2007, 29(3): 80-85. (in Chinese))
- [18] 王远坤, 夏自强, 曹升乐. 水安全综合评价方法研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 35(6): 618-621. (WANG Yuan kun, XIA Zi qiang, CAO Sheng le. Comprehensive evaluation method for water security[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 35(6): 618-621. (in Chinese))
- [19] 卢敏, 张展羽, 石月珍. 集对分析法在水安全评价中的应用研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(5): 505-508. (LU Min, ZHANG Zhanyu, SHI Yue zhen. Application of set pair analysis to evaluation of water safety[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(5): 505-508. (in Chinese))
- [20] 汪红洲, 段衍衍, 傅春. 基于层次分析的安徽省水安全综合评价[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): 37-41. (WANG Hongzhou, DUAN Yanyan, FU Chun. Water security evaluation of Anhui province based on analytic hierarchy process[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(1): 37-41. (in Chinese))
- [21] 黄昌硕, 耿雷华, 王立群, 等. 中国水资源及水生态安全评价[J]. 人民黄河, 2010, 32(3): 14-16. (HUANG Changshuo, GENG Lehua, WANG Liqun. Evaluation on China water resources and water ecological security[J]. Yellow River, 2010, 32(3): 14-16. (in Chinese))
- [22] 李雪松, 李婷婷. 水安全综合评价研究—基于中国 2000-2012 年宏观数据的实证分析[J]. 中国农村水利水电, 2015, (3): 45-49. (LI Xuesong, LI Tingting. Water security evaluation: an empirical analysis based on Chinese macroscopical data from 2000 to 2012[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015, (3): 45-49. (in Chinese))
- [23] 江红, 杨小柳. 基于熵权的亚太地区水安全评价[J]. 地理科学进展, 2015, 34(3): 373-380. (JIANG Hong, YANG Xiaoliu. Entropy weight based water security assessment in Asia Pacific[J]. Progress in Geography, 34(3): 373-380. (in Chinese))
- [24] Fengshun Yang, Dongguo Shao, Chun Xiao, et al. Assessment of Urban Water Security based on Catastrophe Theory[J]. Water Science and Technology, 2012, 66(3): 487-493.

(上接第 143 页)

- [16] 姜永东, 鲜学福, 杨钢, 等. 层状岩质边坡的尖点突变模型[J]. 重庆大学学报. 2008, 31(6): 677-682. (JIANG Yongdong, XIAN Xuefu, YANG Gang, et al. The cusp catastrophe model of layered rock slope[J]. Chongqing University. 2008, 31(6): 677-682. (in Chinese))
- [17] Thom R. Stabilité Structurelle et Morphogenèse. Benjamin W A, Reading, Mass: Benjamin, 1972.
- [18] Thom R. Structural stability and morphogenesis(translate by Fowler G H) [M]. New York: Benjamin Addison Wesley, 1975.
- [19] Thompson J M T, Hunt G W. Instabilities and catastrophes and catastrophes in science and engineering[M]. Chichester: Wiley, 1982.
- [20] Thompson J M T, Zeeman E C. Classification of elementary catastrophes of codimension ≤ 5 . Structural Stability, the Theory of Catastrophes and Application in the Sciences. Lecture Notes in Mathematics 525. Berlin: Springer Verlag, 1976, 263-327.
- [21] Zeeman E C. Catastrophes Theory: Selected Papers(1972-1975), Addison Wesley, Mass, 1977.
- [22] Zeeman E C. Bifurcation, catastrophes and turbulence. New Directions in Applied Mathematics. New York: Springer Verlag, 1982, 105-153.
- [23] Poston T, Stewart I. Catastrophe theory and its application[M]. London: Pitman, 1978.