

基于层次分析法的成都市水安全评价

陈琳, 邹添丞, 石杰, 王子豪, 潘楚昕

(四川大学 水利水电学院, 成都 610065)

摘要: 为了研究成都市水资源的可持续发展现状, 在PSR模型的基础上, 充分结合成都市的实际情况建立了城市水安全评价指标体系, 采用层次分析法计算各指标的权重, 最终得出成都市水安全评价综合指数, 并使用相关分析方法, 对未来水安全情况进行预测。结果表明: 2005年-2013年成都市水安全状况均处于安全状态。为了进一步保证社会、经济、资源、环境的协调发展, 提出了如下建议: 采取措施来提高市民的节水意识; 加大技术投入, 建立节水型城市; 实现水资源的合理利用, 提高水资源的利用率; 增加环境投资, 提高工业和生活污水处理率; 完善城市水资源管理系统和预警机制, 提升应对突发性水环境事件及水资源问题的能力。

关键词: 水安全; PSR模型; 指标体系; 层次分析法; 相关分析; 成都市

中图分类号: TV213; X24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)04-0041-05

Water Security Assessment of Chengdu City Based on Analytic Hierarchy Process

CHEN Lin, ZOU Tian cheng, SHI Jie, WANG Zi hao, PAN Chu xin

(School of Hydraulic and Hydropower Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to investigate the present situation of sustainable development of water resources in Chengdu, this paper adopted the PSR model to establish the index system of water security assessment of Chengdu, determined the weights for each index using the AHP method, obtained the comprehensive index of water security assessment of Chengdu, and predicted the future water security using the correlation analysis method. The results showed that the water security level of Chengdu is grade IV from 2005 to 2013, indicating a security status. Meanwhile, in order to ensure the coordinated development among society, economy, and environment, several suggestions were proposed in this paper, including the improvement of consciousness of saving water and establishment of a water saving city through increased technical investment, the increasing of utilization rate of water resources, the increasing of environmental investment to enhance the rate of municipal and industrial waste water treatment, and the improvement of water resource management system and early warning mechanism to strengthen the ability of coping with the accidental water environmental and resource problems.

Key words: water security; PSR model; index system; AHP; correlation analysis; Chengdu City

1 研究背景

随着城市化进程日益加快、城市规模持续扩大和人口的快速增长, 水安全问题日益突出, 水资源短缺、水污染、突发性水安全事故和持续保障力等问题引起广泛关注。在许多地区, 水资源条件已成为城市发展规模和功能布局的决定性因素。因此, 如何实现城市水资源可持续利用、保障城市水安全, 是当前城市发展中具有基础性和战略性的重大课题^[1]。城市水安全问题既是流域与区域水安全的重要研究内容, 也是城市生态安全的重要组成部分, 直接关系到城市社会经济的可持续发展。城市水安全的综合评价是制定城

市水安全战略与规划、进行城市水安全决策的前提与基础^[2]。目前对水安全以及城市水安全定义的叙述, 不同的学者对此表述不一。贾绍凤等^[3]将水资源安全的实质表述为水资源供给能否满足合理的水资源需求; 韩宇平等^[4]将水安全定义为自然作用或人为作用下区域水状况发生恶化, 由此带来不利影响, 它是从风险角度对水安全的反面特征; 张蕾等^[5]将水安全理解为一种社会状态, 人人都有获得安全用水的设施和经济条件, 所获得的水满足清洁和健康的要求, 满足生活和生产的需要, 同时可使自然环境得到妥善保护。

综合各学者观点, 在这里把城市水安全的概念理解为一种水资源影响下城市可持续发展的能力, 即这种能力确保城

市这一特定区域内,社会经济、生态环境、以及城市居民和人文环境的可持续发展。从已有的研究来看,关于水安全研究还是定性居多、定量偏少。本文采用科学的定量方法对成都市过去几年的水安全状况做出评价,并合理预测其短期内的变化趋势,从而为决策者提供参考,这对于促进城市水资源的合理开发利用、保证和监测城市水安全、推动社会经济可持续发展有着重要意义。

2 研究区域概况

成都地处四川盆地西北边缘山地向盆地过渡的地带,是四川省的省会。从西北方向的龙门山、邛崃山区到东南方向的龙泉山低山深丘区和金堂县沱江以东的丘陵区,成都的地势由高到低,中部地形以平原为主。在气候划分上,成都属亚热带湿润季风气候,四季分明,雨量充沛。成都河流众多,主要属于岷江、沱江两大水系,水域面积达 700 km²。成都市水资源总量比较丰富,根据(2005 年- 2009 年)成都市水资源公报数据计算,全市地表水资源量为 69.78 亿 m³,多年平均径流深为 573.93 mm,全市人均本地水资源量 635.74 m³。

随着城市化建设和经济发展,对水资源的需求,特别是工业需水量增长的幅度很大,供需矛盾将日益突出。加之近年来岷江上游地区生态环境恶化,降水量下降,上游的来水量呈逐年下降的趋势,致使成都市水资源也呈现出不同程度的减少趋势。当成都市在建设西部经济高地的道路上不断前进,城市面临的水安全问题也将越来越突出。

3 评价指标体系

3.1 指标体系的建立

对于评价体系的选择,国内外有很多不同的方案,其中包括水资源承载力、水贫困指数、水足迹以及虚拟水等,还有部分学者通过建立数学模型对区域进行水安全评价,如多层次模糊评价法、系统动力学法、集对分析法、压力-状态-响应结构模型等^[6]。其中压力-状态-响应结构模型(Press State Response Model,简称 PSR 模型)是评估资源利用和可持续发展的模式之一。其中压力指标用以表征造成发展不可持续的人类活动和消费模式或经济系统,状态指标用以表征可持续发展过程中的系统状态,响应指标用以表征人类为促进可持续发展进程所采取的对策。相比较而言,PSR 模型^[7]使自然、社会、经济、环境、资源之间的关系得以充分体现,是对区域水安全评价较适合的模型,相较其他方法更能体现人类和水在可持续发展中的相互作用。

本文在改进的 PSR 模型的基础上,将模型划分为 3 个子系统,3 个层次,在充分考虑当地实际情况下构建了水安全指标体系,见表 1。

3.2 权重的计算

本文采用层次分析法(Analytic Hierarchy Process,简称 AHP)来进行指标权重计算。AHP 把一个复杂问题表示为有序的递阶层次结构,通过定性判断和定量计算,将经验判断给予量化,对决策方案进行排序,是一种定性分析与定量分析相结合的决策分析方法,适用于多准则决策问题,是将

人的主观判断用数量形式表达和处理的方法^[8]。在利用 AHP 进行决策分析时,大体上分为以下 4 个步骤。

(1) 分析系统中各因素之间的关系,建立系统的递阶层次结构。

(2) 对同一层次各元素关于上一层次中的某一准则的重要性进行两两比较,构造两两比较判断矩阵。

(3) 由判断矩阵来计算被比较的元素对于该准则的相对权重。

(4) 计算各层元素对系统总目标的合成权重,并进行排序。

通过专家打分、分析计算、一致性判断等环节,可得到水安全指标体系中各个指标的权重,详见表 1。

表 1 水安全 PSR 模型下的指标体系中各个指标的权重

准则层	要素层	指标层	权重(%)	
压力指标	水资源压力	人均日常生活用水	22.64	
		人均水资源量	68.54	
		水资源开发利用率	22.64	
	水环境压力	工业废水特征污染物排放量	107.09	
		生活污水排放量	43.43	
		社会经济压力	工业万元产值用水量	68.54
		人口密度	12.17	
	洪涝干旱威胁压力	发生概率	9.31	
		经济损失比重	22.64	
	水	环境状态	城市饮用水源水质达标率	24.41
城市人均公共绿地			43.01	
安全	社会经济状态	人均 GDP	60.87	
		城镇恩格尔系数	24.41	
		城市化率	34.12	
全	资源状态	地表水资源量	60.87	
		绿化覆盖率	84.31	
响应指标	环境保护与治理响应	城市污水处理率	31.53	
		工业治理废水总投资占 GDP 比例	95.22	
		工业废水排放达标率	66.30	
	社会经济响应	工业用水重复利用率	17.50	
		农民人均纯收入	17.50	
		防灾应急能力	10.09	
		管理响应	市民节水意识	7.04
	水环境法律法规与管理	45.82		

4 标准化的计算

本文采用经济学的基本原理——“边际效益递减”原理^[9]来研究指标变化对系统的影响。所谓“边际效益递减”,指在短期生产的过程中,在其他条件不变(如技术水平不变)的前提下,增加某种生产要素的投入,当该生产要素投入数量增加到一定程度以后,增加一单位该要素所带来的效益增加量是递减的,边际收益递减规律是以技术水平和生产要素的投入数量保持不变为条件进行讨论的一种规律。

通过与边际效益递减原理的比较研究,分析了各个指标对城市水安全的影响规律,并最终将指标体系分为 3 大类,

分别是越大越优曲线型指标、越小越优曲线型指标和直线型指标^[10]。同时,对3类指标分别建立了评价模型,其中,根据越大越优曲线型指标边际效益变化规律,其评价模型采用幂函数: $y = a + bx^{1/2}$ ($y \in [0, 1]$)。同样,根据越小越优曲线型指标边际效益变化规律,其评价模型采用幂函数: $y = a + bx^2$

($y \in [0, 1]$)。直线型指标评价模型采用一次函数: $y = a + bx$ ($y \in [0, 1]$)。在充分考虑近年来我国城市社会经济发展与水资源系统的关联性,确定了水安全评价指标的评价核算标准,并代入上述模型得出系数 a 和 b 的值,从而最终确定了指标评价模型,见表2。

表2 水安全评价指标的评价标准及评价模型

Table 2 Evaluation standards and models of the index system of water security assessment

指标层	最劣	中间	最优	函数
人均日生活用水/L	60		200	$Y = (-1.21103) + (0.15634)X^{0.5}$
人均水资源量/ m^3	50		1 000	$Y = (-0.288) + (0.041)X^{0.5}$
水资源开发利用率(%)	60		10	$Y = 1.02857 - (0.0002857)X^2$
工业废水特征污染物排放量	COD/($mg \cdot L^{-1}$)	1 000	100	$Y = 1.01010 - (0.000001010)X^2$
	氨氮排放量/($mg \cdot L^{-1}$)		50	$Y = 1.04945 - (0.00022)X^2$
生活污水排放量/ $10^4 m^3$	50 000		15 000	$Y = 1.0989 - (0.0000000043956)X^2$
工业万元产值用水量/ m^3	300		6	$Y = 1.0004 - (0.00011116)X^2$
人口密度/(人· km^2)	1 300		500	$Y = 1.17361 - (0.000006944)X^2$
发生概率/(次· a^{-1})	5		0	$Y = 1 - (0.2)X$
经济损失比重(%)	2	1	0	$Y = 1 - (0.5)X$
城市饮用水水质达标率(%)	0		100	$Y = (0.01)X$
城市人均公共绿地/ m^2	0		16	$Y = (0.25)X^{0.5}$
人均GDP/万元	1.3		5.3	$Y = (-0.98122) + (0.86059)X^{0.5}$
城镇恩格尔系数(%)	60		30	$Y = 1.33333 - (0.00037)X^2$
城市化率(%)	0		85	$Y = (0.10847)X^{0.5}$
地表水资源量/ $10^8 m^3$	5		100	$Y = (-0.28801) + (0.128801)X^{0.5}$
绿化覆盖率(%)		30	60	$Y = (-0.786) + (0.231)X^{0.5}$
城市污水处理率(%)	0		100	$Y = (0.01)X$
工业治理废水总投资占GDP比例(%)	0		0.2	$Y = (2.2361)X^{0.5}$
工业废水排放达标率(%)	0		100	$Y = (0.01)X$
工业用水重复利用率(%)	0		100	$Y = (0.01)X$
农民人均纯收入/元	0		8 000	$Y = (0.01118)X^{0.5}$
防灾应急能力	0		1	$Y = X$
市民节水意识	0		1	$Y = X$
水环境法律法规与管理	0		1	$Y = X$

注:表中最优最劣评价标准参考相关工业标准和国内外发达城市指标标准。

5 成都市2005年-2009年的水安全评价

5.1 水安全等级划分

水安全指标评价标准通过将各指标量化分级进行确定。具体方法为:参照国内外专家学者的研究成果,考虑我国目前的社会经济发展水平,以国家标准、国际标准和发展规划值为依据,通过咨询专家学者,确定各因素隶属不同等级的范围,研究具体指标的临界点以确定指标评价标准。水安全程度按 \tilde{N} 、 $\tilde{0}$ 、 $\tilde{0}$ 、 $\tilde{0}$ 、 $\tilde{0}$ 划分为5个级别,见表3。

表3 水安全程度等级

Table 3 Level of water security

安全等级	很不安全	不安全	基本安全	安全	非常安全
综合指数取值范围	[0, 0.2]	[0.2, 0.5]	[0.5, 0.7]	[0.7, 0.9]	[0.9, 1]

(1) 级别 \tilde{N} : 很不安全。水资源和水环境系统全面恶化,水量极度短缺,干旱、洪涝,水质严重污染,水环境功能丧失,已严重阻碍了城市经济以及社会的可持续发展。此级别建议政府发出一级响应警告。

(2) 级别 $\tilde{0}$: 不安全。水资源和水环境系统不能与社会、经济协调发展,已威胁到城市经济、社会可持续发展,水量短缺,水质污染比较严重,水环境功能退化。此级别建议政府发出二级响应警告。

(3) 级别 $\tilde{0}$: 基本安全。水资源和水环境系统与社会、经济能协调发展,城市经济、社会可持续发展满意程度一般,水量供给维持在临界状态,存在水质污染的现象,但水环境功能还具有一定的恢复能力。此级别建议政府加强水安全管理。

(4) 级别 $\tilde{0}$: 安全。水资源和水环境系统与社会、经济健康协调发展,城市经济、社会可持续发展满意程度较高,水量能够满足要求,水质轻微污染,水环境的自我恢复能力较强。此级别建议政府保持水安全管理现状。

(5) 级别 $\tilde{0}$: 非常安全。水资源和水环境系统与社会、经济健康协调高效发展,城市经济、社会可持续发展满意度很高,水量充足,水质良好,水环境功能优良且不易受到影响。此级别建议政府保持水安全管理现状。

5.2 水安全评价

在进行城市水安全评价时,把各个指标每一年的实际数

值代入其对应的指标得分评价模型中,即可得到该年份各个指标的得分 y_{ij} ,再结合其各自的权重 w_i ,对当年成都市的水

安全情况做出综合评价,见表 4。

结合表 1 给出的指标权重 w_i 和表 3 中给出的各个指标

表 4 成都市 2005 年至 2009 年各个评价指标的得分情况

Table 4 Scores of each index of water security assessment from 2005 to 2009 in Chengdu

准则层	要素层	指标层	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年
水	水资源压力	人均日生活用水	1.000	1.000	1.000	0.678	0.697
		人均水资源量	0.801	0.676	0.718	0.875	0.679
		水资源开发利用效率	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000
	水环境压力	工业废水特征污染物排放量	0.868	0.829	0.825	0.788	0.955
		生活污水排放量	0.996	1.000	0.991	0.509	0.519
	社会经济压力	工业万元产值用水量	0.786	0.851	0.903	0.912	0.957
		人口密度	0.644	0.623	0.614	0.582	0.568
	洪涝干旱威胁压力	发生概率	0.000	0.800	0.800	0.400	0.600
		经济损失比重	0.966	0.924	0.999	0.982	0.99
	环境状态	城市饮用水源水质达标率	0.997	0.999	0.977	0.977	0.992
城市人均公共绿地		0.740	0.759	0.818	0.815	0.824	
状态指标	社会经济状态	人均 GDP	0.298	0.382	0.420	0.532	0.729
		城镇恩格尔系数	0.872	0.908	0.771	0.816	0.827
		城市化率	0.840	0.858	0.858	0.861	0.874
资源状态	地表水资源量	0.811	0.698	0.758	0.929	0.729	
	绿化覆盖率	0.547	0.609	0.629	0.638	0.657	
响应指标	环境保护与治理响应	城市污水处理率	0.798	0.793	0.822	0.795	0.885
		工业治理废水总投资占 GDP 比例	0.548	0.625	0.632	0.707	0.592
		工业废水排放达标率	0.962	0.842	0.964	0.987	0.997
	社会经济响应	工业用水重复利用率	0.813	0.822	0.837	0.874	0.880
		农民人均纯收入	0.749	0.783	0.824	0.900	0.944
		防灾应急能力	0.600	0.650	0.700	0.750	0.850
管理响应	市民节水意识	0.600	0.630	0.650	0.680	0.700	
	水环境法律法规与管理	0.700	0.800	0.850	0.900	0.950	

注: 2005 年-2009 年数据来自成都市水资源公报^[11] 和成都市统计年鉴^[12]。

的得分 y_{ij} , 通过水安全综合评价指数的计算公式 $S_j = \sum_{i=1}^n w_i y_{ij}$, 得到成都市 2005 年-2009 年的水安全综合评价指数 S_j , 见表 5。由表 5 中数据知, 成都市 2005 年-2009 年的水安全状态均处于安全级别, 水量能够满足要求, 水质的污染比较轻微, 水环境的自我恢复能力较强。

表 5 成都市 2005 年-2009 年的水安全综合评价指数

Table 5 Comprehensive evaluation index of water security from 2005 to 2009 in Chengdu

年份	2005	2006	2007	2008	2009
水安全评价综合指数	0.7257	0.7350	0.7624	0.7691	0.7789

6 成都市 2010 年-2013 水安全情况的预测

进行成都市未来水安全的状况进行预测时, 通过分析子指标“人均 GDP”在 2000 年-2011 年中发展趋势, 利用趋势线对该指标进行延长, 得到相关趋势线的函数以及相应的拟合程度指标 $R^2 = 0.988$, 预测 2012 和 2013 年的人均 GDP 分别为 5.47 万元和 6.18 万元。

再通过相关分析, 将人均 GDP 与城市水安全的综合指数进行比较, 得到拟合度 R^2 为 0.907 的趋势线 $y = 0.713e^{0.017x}$, 参照已得到的人均 GDP 预测出 2010 年-2013 年的水安全指数见表 6。

表 6 成都市 2010 年-2013 年水安全预测

Table 6 Prediction of water security in Chengdu

年份	2010	2011	2012	2013
水安全评价综合指数	0.7740	0.7747	0.7825	0.7920

由此, 得到成都市 2012 年水安全综合评价指数为 0.7825, 预计 2013 年会达到 0.7920, 水安全状况良好, 综合指数有上升的趋势(图 1), 水资源和水环境系统与社会、经济健康协调发展, 城市经济、社会可持续发展满意程度较高。

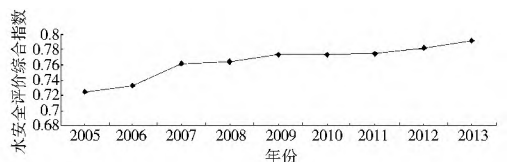


图 1 成都市水安全评价综合指数

Fig. 1 Comprehensive evaluation index of water security in Chengdu

7 结语

通过采用改进的 PSR 模型以及 AHP 计算分析方法, 对成都市 2005 年-2009 年的水安全进行综合评价, 得出水安全状态处于安全级别, 与成都市的实际情况基本符合, 也验证了该评价方法的可靠性与有效性。但是权重较大的人均

GDP、绿化覆盖率、工业治理废水总投资占GDP比例的得分并不是很高,还有待改善,以进一步提高水安全状况。

通过相关分析,对2010年-2013年成都市水安全情况进行预测,得出水安全在这几年里亦处于安全级别,并呈现上升趋势,成都市的水安全的情况比较乐观。

虽然如此,随着城市的不断发展,成都市仍然要将经济和城市化发展规模保持在现有的水环境的承载力范围之内,将水资源视为重要战略资源给予高度重视。一方面要提高市民的节水意识,建立节水型城市,完善水资源的法律法规,力争达到人与水和谐发展的局面;另一方面进一步开展水利建设,加大技术投入,提高水资源的利用率,实现水资源的合理利用;同时还应增加环境投资,对工业污水以及生活污水进行处理,提高处理率,减少对水质的污染;最后,还要建立完善的城市水资源管理系统和预警机制,提升城市应对突发性水环境事件及水资源问题的能力。

致谢:感谢水力学与山区河流开发保护国家重点实验室李克锋老师在论文写作中给予的指导。

参考文献(References):

- [1] 史正涛,刘新有.城市水安全的概念、内涵与特征辨析[J].水文,2008,28(5):24-27. (SHI Zheng-tao, LIU Xin-you. Concept and Connotation of Urban Water Security[J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(5): 24-27. (in Chinese))
- [2] 靳春玲,贡力.基于PSR模型的城市水安全评价研究[J].安全与环境学报,2009,9(5):104-108. (JIN Chun-ling, GONG Li. On the Urban Water Security Assessment Based on the Pressure-State-Response Model[J]. Journal of Safety and Environment, 2009, 9(5): 104-108. (in Chinese))
- [3] 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. (JIA Shaofeng, ZHANG Junyan, ZHANG Shifeng. Regional Water Resources Stress and Water Resources Security Appraisal Indicators[J]. Progress in Geography, 2002, 21(6): 538-545. (in Chinese))
- [4] 韩宇平,阮本清.区域水安全评价指标体系初步研究[J].环境科学学报,2003,23(2):267-272. (HAN Yurping, RUAN Benqing. Research on Evaluation Index System of Water Safety[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, 23(2): 267-272. (in Chinese))
- [5] 张蕾,韩雪冰,范兴华.基于层次分析法的南京市水安全评价[J].水电能源科学,2012,30(12):30-33. (ZHANG Lei, HAN Xuebing, FAN Xinghua. Research on Hydrology and Pollution Characteristics of Urban Pavement Runoff[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(12): 30-33. (in Chinese))
- [6] 张戈丽,王立本,丁世刚.基于AHP的济南市水安全评价研究[J].山东师范大学学报(自然科学版),2007,22(3):94-97. (ZHANG Geli, WANG Liben, DING Shigang. A Study of Water Security Assessment of Jinan City Based on Analytic Hierarchy Process[J]. Journal of Shandong Normal University (Natural Science), 2007, 22(3): 94-97. (in Chinese))
- [7] 陈绍金.水安全系统评价、预警与调控研究[M].北京:中国水利水电出版社,2006. (CHEN Shaolin. Evaluation Forecasting and Regulation Research in the Water Safety System[M]. Beijing: China water power press, 2006. (in Chinese))
- [8] 魏世效,周献中.多属性决策理论方法及其在C3I系统中的应用[M].北京:国防工业出版社,1998:155-170. (WEI Shixiao, ZHOU Xianzhong. Multiple Attribute Decision Making Theory, Methods and Applications in C3I Systems[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998: 155-170. (in Chinese))
- [9] 周慧中.微观经济学[M].上海:上海人民出版社,1999:110-120. (ZHOU Hui zhong. Microeconomics[M]. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 1999: 110-120. (in Chinese))
- [10] 黄英,刘新友,史正涛,等.复杂系统评价指标的评价方法研究—以城市水安全为例[J].水文,2009,29(2):45-48. (HUANG Ying, LIU Xin you, SHI Zheng tao, et al. Study on Assessment Methods of Evaluate Indexes for Complex System: Taking Urban Water Safety as Case[J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(2): 45-48. (in Chinese))
- [11] 成都市水利局.成都市水资源公报(2005年-2009年)[R].成都市水利局. (Chengdu Water Conservancy Bureau. Chengdu Water Resources Bulletin (2005-2009) [R]. Chengdu Water Conservancy Bureau. (in Chinese))
- [12] 成都市统计局.成都市统计年鉴(2005年-2009年)[R].成都市统计局. (Chengdu Statistics Bureau. Statistical Yearbook of Chengdu (2005-2009) [R]. Chengdu Statistics Bureau. (in Chinese))