

Evaluating Index System and Methods of Regional Water Resources Sustainable Utilization

Wei Tian, Baohui Men*, Chengjun Qu, Huanlong Liu, Zhijian Wu, Wanxin Bai

Renewable Energy Institute, North China Electric Power University, Beijing

Email: *menbh@126.com

Received: May 13th, 2016; accepted: May 31st, 2016; published: Jun. 3rd, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Water is the source of life and on which human being exists and social economy develops sustainable. There still remain many problems challenging the sustainable water resource utilization, such as imbalance between the demand and the supply, the low efficiency utilization and the worsening water environment. So the studying of evaluating index system and methods of regional water resource sustainable utilization becomes the prior problem to solve. On the base of realizing the current situation and developing tendency, the accurate evaluation of the sustainability of water resources is attached more and more important. By leaning the summary of lots of systems in evaluating the sustainability of domestic and foreign, the problems of methods and index system are summarized. It is pointed out that there remain problems that it's still something wrong with the method to build the index system and that there's limitation in characteristic index. Simultaneously, by analyzing the present evaluation method, it is admitted that subjective weighting is easy to realize but with a comparatively worse accuracy, while objective weighting can utilize the data completely but is too fussy to operate it. No-weighting method like ANN is easy to operate, but it mostly depends on the fake data. At last, the problem and development tendency are summarized to attract some new opinions of studying the sustainable regional water resources utilization and push the improvement of the evaluation system of sustainable water resources utilization.

Keywords

Water Resource, Sustainable Utilization, Index System, Evaluation Method

作者简介: 田巍(1996-), 水文与水资源工程专业学士。

*通讯作者。

文章引用: 田巍, 门宝辉, 屈承珺, 刘焕龙, 吴智健, 白婉欣. 区域水资源可持续利用指标体系及评价方法的研究进展[J]. 水资源研究, 2016, 5(3): 246-254. <http://dx.doi.org/10.12677/jwrr.2016.53031>

区域水资源可持续利用指标体系及评价方法的研究进展

田 巍, 门宝辉*, 屈承珏, 刘焕龙, 吴智健, 白婉欣

华北电力大学, 可再生能源学院, 北京

Email: *menbh@126.com

收稿日期: 2016年5月13日; 录用日期: 2016年5月31日; 发布日期: 2016年6月3日

摘 要

水是生命之源, 是人类生存和社会经济可持续发展的基础, 鉴于目前水资源供需矛盾加剧、利用效率低下、水环境恶化等问题日益凸显, 水资源的可持续利用受到严峻的挑战, 因此, 研究区域水资源可持续利用的指标体系及其评价成为当务之急。在正确地认识水资源的现状及发展趋势的基础上, 对水资源的可持续性进行准确的评价成为重中之重。通过对近年来国内外水资源可持续利用评价领域的多种体系进行总结, 从指标体系的构建方法和评价方法两个角度进行归纳, 指出了目前指标体系构建方法的可操作性仍存在不足, 特征指标仍存在相对局限等问题, 同时对目前的评价方法进行了分析, 认为主观赋权易于实现, 但精度差, 客观赋权能较全面地利用数据, 但过于繁琐, 而诸如神经网络的不赋权法操作简单易行, 但结果过度依赖于已有数据样本集。通过对国内外水资源可持续利用评价体系中存在的问题和发展趋势的梳理和归纳, 以期引发对区域水资源可持续利用研究的新思考, 推动水资源可持续利用评价体系及其评价方法的改进和完善。

关键词

水资源, 可持续利用, 指标体系, 评价方法

1. 引言

为了让地球在满足当代人们需求的同时不影响下一代人类的正常生活, 20 世纪 80 年代“可持续发展”这一理念第一次被人们所知。可持续发展就是社会、经济、资源和环境协调发展, 以实现人类长久不衰、可持续的目标, 而实现这一目标的关键在于如何解决水资源的可持续利用问题。

水资源可持续利用是维系整个人类社会长远可持续发展的基础, 如果水资源不能够被人类合理可持续地利用, 那么社会和经济的进步必定会受到严重制约。水资源可持续利用的核心是提高用水效率、保护生态环境和改善城市供水现状, 这对于社会的稳定、城市的可持续发展和人民生活水平的提高具有重要意义, 因此我们必须正确认识水资源的现状及发展趋势, 并且对水资源的可持续利用进行评价。国内外学者已经在这一领域研究数十年, 目前, 指标体系的建立主要采用层次结构法、水足迹分析法等, 典型的评价方法按权重的确定方式可以分为客观赋权法、主观赋权法、不赋权法以及主客观结合赋权法等。本文将这些有代表性指标体系和评价方法进行梳理和归纳总结, 以期引发对区域水资源可持续利用研究的新思考, 推动水资源可持续利用评价体系及其评价方法的改进和完善。

2. 指标体系的构建方法

水资源可持续利用评价是基于某一评价区域的水资源供需情况, 建立合适的指标体系及相应的评价方法,

然后对各指标集在总体上进行排序分类。基于此才能衡量一个区域水资源利用的情况，做出水资源是否能够可持续利用的科学评定，继而采取相应的决策和措施。在区域水资源可持续利用评价体系中，合理有效地构建指标体系，对于整个评价具有基础性和决策性的作用。国内学者已经开展了大量关于水资源可持续利用指标体系及其应用方面的研究，指标体系的构建方法和理论方法多种多样(见表 1)。在国外，水资源可持续利用常纳入水资源可持续管理的范畴，相关的研究主要是对于不同尺度下的评价应用的效果[1]、评价方法[2]、水资源的不确定模拟[3]、协调水资源利益相关者的管理决策[4]等。

2.1. 层次结构法

层次结构法是是基于层次分析法(AHP) [5]提出的，指标体系分为目标层、准则层和指标层。目标层为研究区域水资源的可持续利用状态，准则层是具体表征水资源可持续利用的特征宏观指标，指标层是具体的特征指标[6]。根据准则层划分的不同，可产生不同的指标体系。诸如以社会、经济、生态三个子系统为准则层的社会-经济-环境复合系统法(RSWRS)；以压力(Pressure)、状态(State)和响应(Response)为准则层的压力-状态-反应(PSR)结构模型，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的一些因素，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[6]；以驱动力(Driving forces)、压力(Pressure)、状态(State)、影响(Impact)和响应(Response)为准则层的 DPSIR 框架模型[7]。

2.2. 足迹法

足迹法是加拿大经济学家 William 和其博士生 Wackernagel 于 20 世纪 90 年代提出的，该方法引入生态生产性土地来定量分析自然资源的可持续利用程度[8]。水资源评价领域的应用主要是水资源生态足迹法和水足迹法。其中，水资源生态足迹分析法是用水资源生态盈余和生态赤字来衡量水资源可持续利用程度[9]。而水足迹[10]则是 2002 年，荷兰屯特大学的 Hoekstra 教授类比“生态足迹”概念提出了这一概念，将其解释为“水在生产和消费过程中踏过的脚印”，根据水足迹的概念逐渐发展为评价水资源可持续利用的水足迹分析法，水足迹是水消费和水污染的体积衡量指标，它不仅包括各种“颜色”(蓝水、绿水、灰水)的水，弥补了传统水资源核算中只着重“蓝水”的问题，而且将人们的生产和消费与水资源消耗、污染联系起来[11]。

2.3. 聚类法

聚类法中比较有代表性的是特征指标法和归纳法。特征指标法是在充分整理评价区域的情况下，基于特定的评价目的提出的具有代表性的综合性指标，尽可能的表征水资源可持续利用的情况。归纳法[12]是在已有众多

Table 1. The process of evaluating index system of regional water resources sustainable utilization
表 1. 区域水资源可持续利用体系指标体系的构建方法的研究进展

分类	方法	研究者与研究主题
层次结构法	系统层次结构法	李湘姣, 王先甲[13]。珠江三角洲水资源可持续利用综合评价分析
	社会-经济-环境复合系统法	杨广, 何新林, 李俊峰等[14]。玛纳斯河流域水资源可持续利用评价方法
	压力-状态-反应(PSR)结构模型	唐珍宝[15]。基于 PSR 模型的福建省水资源可持续利用评价研究
生态足迹法	DPSIR 指标体系	高波, 王莉芳, 庄宇[16]。DPSIR 模型在西北水资源可持续利用评价中的应用
	水资源生态足迹分析法	邢清枝, 任志远, 王丽霞等[8]。基于生态足迹法的陕北地区水资源可持续利用评价
	水足迹分析法	邓晓军, 谢世友, 秦婷等[17]。基于水足迹分析法的四川省水资源利用评价
聚类法	特征指标法	朱照宇, 欧阳婷萍, 邓清禄[18]。珠江三角洲经济区水资源可持续利用初步评价
	归纳法	邹君[19]。湖南省水资源可持续利用综合评价研究
预警评价法	预警评价法	文俊, 金菊良, 王龙等[20]。区域水资源可持续利用预警评价的理论框架探讨

指标的基础上,通过某种方式进行指标筛选归纳,最后从不同类别中选择代表性较好的指标构成指标体系。

2.4. 预警评价法

预警评价是一种新的发展形式,它是从预警的角度出发,选择合适的指标建立指标体系,这一方法可以明晰水资源开发利用与经济、社会持续发展之间的关系,协调环境和其他的自然资源的持续利用[20]。

2.5. 指标体系构建方法评述

通过对上述各类指标体系建立的方法的总结,可以看出指标体系的内涵丰富,各种方法所构建的指标体系都具有各自的特性和一定的适应性。

- 1) 层次结构法建立指标体系,充分利用层次结构清晰明了的特性,建立的指标比较全面,具有比较强的代表性,通常其使用理论逻辑和专家经验从指标内涵进行筛选,但不可避免的具有一定的主观性。
- 2) 生态足迹法是目前当前较新的研究方法,其较好地描述了水资源在循环中的过程,利用其建立指标较好地代表了水资源的可持续利用情况,但其只局限于水资源自身,没有将与之密切联系的其他指标包含其中。
- 3) 聚类法利用数学方法进行客观筛选,可以根据数据的结构和特征删除重复指标,最大程度的提取有利指标,但没能处理不确定的干扰信息,较大的依赖于已有的数据。
- 4) 预警评价法从预警的角度建立指标,对于特定地区的水资源评价具有很强的现实意义和价值。

3. 评价方法

随着人们对水资源可持续利用研究的日益重视,评价水资源可持续利用的评价方法也得到了飞速发展。各项指标在实际评价过程中主要靠权重体现其重要性,评价方法的核心即在于权重的确定,而如何合理客观地确定权重一直是评价研究中的关键和难点。从权重的确定方法的角度可以分为主观赋权法、客观赋权法、主客观组合赋权法和不赋权法(见表 2)。

3.1. 主观赋权法

主观赋权法在赋权的过程中,通过人的相关经验对权重进行直接或间接的赋予,结果比较符合的人的观念。相关的方法主要有综合指数法、层次分析法等,这些方法共同点在于在确定权重的过程中,人的主观意志有很大的影响。其中,层次分析法作为使用最广泛的方法,其赋权方法也是德尔菲法,无论怎么改进,都无法避免人的参与。所以,该类方法主要是基于专家或者其他专业认识的个人经验和实际情况,整体的运算相对简单易于操作,但是因为人主观意识的过度参与,造成最终结果的主观性较强,造成说理性相对较差。

3.2. 客观赋权法

客观赋权法是利用已有的实际数据,通过不同的数学方法,对其内在关系进行挖掘,以此来确定相应指标的权重。目前主要使用方法有灰色聚类评价法、因子分析法、主成分分析、集对分析法等。这些方法具有较强的数学特征,因子分析法和主成分分析都是统计学的分析方法,主要在于指标的约简,通过数据关系,找出影响变量的主要因子和成分,以此来寻找权值;灰色聚类引入白化函数,按灰类进行归纳聚类;集对分析法[21]对解决具有不确定性的问题有独特的优势,适合于水资源这种不确定因素较多的问题。客观赋权法具有其极强的科学性,说理性较强,不足之处在于过度依赖于数据,有时得出的结论可能与实际情况相符。

3.3. 主客观相结合赋权法

鉴于主观赋权主观性太强和客观赋权过度依赖于数据量的问题,众多学者倾向将两种方法结合,综合考虑两种方法优点来确定权重。通过将两种方法的结合,实现优势互补,充分利用主观赋权对于实际情况的考量和

Table 2. The process of assessing methods of regional water resources sustainable utilization
表 2. 区域水资源可持续利用评价方法的研究进展

分类	方法	研究者与研究主题
主观赋权法	综合指数法	陈仁杰等[22]。水质评价综合指数法的研究进展
	层次分析法	易丽萍等[23]。基于层次分析法的阿克苏地区水资源可持续开发利用评价
客观赋权法	灰色聚类评价法	黄初龙等[24]。中国东北地区农业水资源利用水平灰色聚类评价
	因子分析法	赵甲[25]。基于因子分析法的北京市水资源短缺问题研究
	集对分析模型	黎枫等[26]。基于熵权的集对分析法在水资源可持续利用评价中的应用——以塔里木河三源流地区为例
	主成分分析法	麻荣永等[27]。基于主成分分析法的广西水资源可持续利用综合评价
主客观相结合赋权法	模糊物元分析法	杨阳等[28]。基于改进模糊物元分析法的区域最严格水资源管理评价
	物元可拓模型	李立铮等[29]。物元可拓模型在水资源可持续利用评价中的应用
	基于模糊积分的模糊综合评判法	李俊晓等[30]。基于 AHP-模糊综合评价方法的泉州市水资源可持续利用评价
	基于最大熵原理的模糊综合评判法	王栋[31]。基于最大熵原理的水环境模糊优化评价模型
不赋权法	密切值法	李恩宽等[32]。密切值法在水环境质量综合评价中的应用
	模糊对向传播神经网络	程瑶等[33]。区域水资源可持续利用系统评价的模糊对向传播神经网络模型
	反向误差传播神经网络	刘丹丹等[34]。基于反向传播神经网络的区域水资源需求量预测——以金华市为例
	广义回归神经网络	崔东文等[35]。基于 GRNN 模型的区域水资源可持续利用评价——以云南文山州为例
	投影寻踪模型	金菊亮等[36]。投影寻踪模型在水资源工程方案优选中的应用
	粗糙集和突变级数相耦合	王壬等[37]。基于粗糙集和突变级数法的区域水资源可持续利用评价
	改进型量子遗传算法	赵晓莉等[38]。改进型量子遗传算法应用于区域水资源可持续利用评价

客观赋权法对于数据的挖掘及其极强的科学性。其中，物元分析法[39]、模糊综合评判可以对事物及其系统做出相对完整的评价，并得到相对准确结论的多因素决策方法，是主要的主客观相结合赋权的途径，同时，这两种方法也着重于与其他方法的结合使用，如模糊物元分析法、物元可拓模型[40]、基于模糊积分的模糊综合评判法、基于最大熵原理的模糊综合评判法。

3.4. 无赋权法

随着近几十年计算机科学的兴起和相关数学理论的完善，越来越多的学者开始转向对于大数据的挖掘，开辟出一些新的领域，对于评价类问题也逐步转向所谓的黑箱模型，即不再去考量其中指标的权值，只关注其输入输出。目前，使用较多的有密切值法、人工神经网络、投影寻踪模型、粗糙集和突变级数耦合的方法、遗传算法等方法。其中，密切值法专注于数据内部关系，将差异性转化为距离为主的密切值，以此来进行综合排序；而人工神经网络模拟神经元的工作方式，只需要一定的训练集样本，就可以对其他未知数据进行输入，随着发展衍生出多种模式，实用性大大增强；投影寻踪法同样是处理复杂问题，将其尽可能的进行降维，用较少的指标来代表系统；粗糙集和突变级数相耦合的方法将粗糙集的约简性质、突变理论和模糊理论相结合，以隶属度函数值来进行评价。这些方法只是代表当前的发展趋势，随着智能算法的继续发展，在水资源可以持续利用评价中的应用具有很大提升空间。

3.5. 评价方法的评述

随着科技的发展和专家学者研究的深入,水资源可持续利用的评价方法更加丰富创新,也使得评价的结果愈发准确合理。不同的方法具有各自的特点与优势,但在实际使用过程中仍可发现其具有的不足和局限。

1) 主观赋权法通过人为建立评价价值与等级间的函数关系,在确定各指标权重时能更好的反映决策者的意向,体现出决策者对不同指标的重视程度,并且操作相对简单,免除了复杂的数理运算。但其结论有很强的主观性,这很大程度上影响了最终结论的准确性,导致信服力不足;同时采用主观赋权法会增加决策分析者的负担,因此在应用中有很大的局限性。

2) 客观赋权法确定的权重具有较强的数学理论依据,可以充分挖掘数据的内在规律,找到客观的评价结果,信服力较高,但由于其依赖于大量的样本数据和实际的问题,普适性较差,同时计算方法也较为复杂,并且在计算权重过程中,不能体现评判者对不同决策指标的重视程度,有时候定的权重会与决策指标的实际情况有较大差别。

3) 对于诸如人工神经网络一类的黑箱模型,在评价过程中无需赋权,评价结果较为客观,并且操作简单,只需提供历年的数据即可得到模型,省略了复杂的计算过程;但由于其只根据指标间的数值关系来进行评价,得到的结果可能不符合实际,同时为了得到足够精确的结论,必须提供足够多的样本值来进行检验,增加了工作的负担。

4) 将不同方法结合使用是现在评价过程中所使用的主流方法。例如本文提到过的主客观相结合的赋权法。这种评价方法可以很大程度的解决某种方法本身所具有的问题,提高评价结果的准确性。但由于方法间的组合使用缺乏足够的理论依据,因此其合理性有待于进行检验;同时将不同方法结合使用可能会增大评价过程的复杂程度,增加评价工作的负担。

4. 结语

水资源可持续利用评价是一个复杂的多目标、多层次、多属性的问题,其主要包括指标体系的建立及评价方法的确定。这两个过程需要结合区域水资源的特点、考虑区域经济发展的不平衡、水资源开发利用程度差异等因素。本文通过对构建指标体系的不同方法进行综述,指标的选择从一开始只涉及水资源系统,到层次结构法中涵盖多个子系统,以及生态足迹法中对间接用水进行考虑,更加全面地反应水资源的可持续性。

通过对多种评价方法的总结归纳,可以看出随着研究的深入,能够直接通过数据分析得到评价结果的无赋权模型成为研究的重点发展方向,例如人工神经网络和遗传算法等。相较于传统的主客观赋权法,无赋权模型既可以减少赋权过程中的主观性,避免人为干预的影响,提高评价结果的准确度;又能够避免繁琐的数学计算,减少工作者的负担。当然,黑箱模型仍有相当的发展空间,例如如何增加与决策者的交互性,怎样避免不合理数据的影响等问题,相信这是水资源可持续利用评价体系的下一步研究方向。

基金项目

华北电力大学大学生创新创业项目资助,华北电力大学(北京校部)2014年教育教学改革项目(2014JG57)。

参考文献 (References)

- [1] SALVATI, L., CARLUCCI, M. A composite index of sustainable development at the local scale: Italy as a case study. *Ecological Indicators*, 2014(43): 162-171. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.02.021>
- [2] EL-FADEL, M., TOMASZKIEWICZ, M., ADRA, Y., et al. GIS-based assessment for the development of a groundwater quality index towards sustainable aquifer management. *Water Resources Management*, 2014, 28(11): 3471-3487. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-014-0683-2>
- [3] RYU, J. H., CONTOR, B., JOHNSON, G., et al. System dynamics to sustainable water resources management in the eastern

- snake plain aquifer under water supply uncertainty. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2012, 48(6): 1204-1220. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688.2012.00681.x>
- [4] HATTERMANN, F. F., WEILAND, M., HUANG, S., et al. Model-supported impact assessment for the water sector in Central Germany under climate change—A case study. Water Resources Management, 2011, 25(13): 3113-3134. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-011-9848-4>
- [5] WILLETT, K., SHARDA, R. Using the analytic hierarchy process in water resources planning: Selection of flood control projects. Socio-Economic Planning Sciences, 1991, 25(2): 103-112. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-0121\(91\)90008-F](http://dx.doi.org/10.1016/0038-0121(91)90008-F)
- [6] 宋松柏. 区域水资源可持续利用指标体系及评价方法研究[D]: [博士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2003.
SONG Songbai. Study of indicators system and assessment methods for regional sustainable utilization in relation to water resources. Yangling: Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2003. (in Chinese)
- [7] BORJA, Á., GALPARSORO, I., SOLAUN, O., et al. The European Water Framework Directive and the DPSIR, a methodological approach to assess the risk of failing to achieve good ecological status. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 66(1-2): 84-96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2005.07.021>
- [8] 邢清枝, 任志远, 王丽霞, 等. 基于生态足迹法的陕北地区水资源可持续利用评价[J]. 干旱区研究, 2015(6): 25-30.
XING Qingzhi, REN Zhiyuan, WANG Lixia, et al. Evaluation on sustainable utilization of water resource in north Shaanxi province based on ecological footprint model. Arid Zone Research, 2015(6): 25-30. (in Chinese)
- [9] 樊华. 基于生态足迹理论的陕北生态环境可持续发展研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2010.
FAN Hua. Study on ecological environment sustainable development in northern shaanxi based on the theory of ecological footprint. Ph.D. Thesis, Beijing: Beijing Forestry University, 2010. (in Chinese)
- [10] HOEKSTRA, A. Y., CHAPAGAIN, A. K. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. Water Resources Management, 2007, 21(1): 35-48. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-006-9039-x>
- [11] 周玲玲, 王琳, 余静. 基于水足迹理论的水资源可持续利用评价体系——以即墨市为例[J]. 资源科学, 2014, 36(5): 913-921.
ZHOU Lingling, WANG Ling and YU Jing. Assessment system of water resource sustainable utilization based on water footprint theory: A case study of Jimo. Resources Science, 2014, 36(5): 913-921. (in Chinese)
- [12] 宋松柏, 蔡焕杰, 徐良芳. 水资源可持续利用指标体系及评价方法研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(5): 647-652.
SONG Songbai, CAI Huanjie and XU Liangfang. Indicators system for region sustainable water resources utilization and its assessing methods. Advances in Water Science, 2003, 14(5): 647-652. (in Chinese)
- [13] 李湘蛟, 王先甲. 珠江三角洲水资源可持续利用综合评价分析[J]. 水文, 2006, 25(6): 12-17.
LI Xiangjiao, WANG Xianjia. Integrated assessment and analysis of the water resources sustainable utilization in the area of Pearl River delta. Hydrology, 2006, 25(6): 12-17. (in Chinese)
- [14] 杨广, 何新林, 李俊峰, 等. 玛纳斯河流域水资源可持续利用评价方法[J]. 生态学报, 2011, 31(9): 2407-2413.
YANG Guang, He Xinlin, Li Junfeng, et al. The research of water resource sustainable utilization in Manas River. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(9): 2407-2413. (in Chinese)
- [15] 唐珍宝. 基于 PSR 模型的福建省水资源可持续利用评价研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(3): 169-173.
TANG Zhenbao. Evaluation and research of water resources sustainable utilization in Fujian province based on PSR model. Environmental Science and Management, 2015, 40(3): 169-173. (in Chinese)
- [16] 高波, 王莉芳, 庄宇. DPSIR 模型在西北水资源可持续利用评价中的应用[J]. 四川环境, 2007, 26(1): 33-35.
GAO Bo, WANG Lifang. Application of DPSIR framework in the evaluation of sustainable water use in northwest China. Sichuan Environment, 2007, 26(1): 33-35. (in Chinese)
- [17] 邓晓军, 谢世友, 秦婷, 等. 基于水足迹分析法的四川省水资源利用评价[J]. 人民长江, 2007, 38(2): 61-63.
DENG Xiaojun, XIE Shiyu, QIN Ting, et al. Based on water footprint analysis method of evaluation in the utilization of water resources in Sichuan province. Yangtze River, 2007, 38(2): 61-63. (in Chinese)
- [18] 朱照宇, 欧阳婷萍, 邓清禄. 珠江三角洲经济区水资源可持续利用初步评价[J]. 资源科学, 2002, 24(1): 55-61.
ZHU Zhaoyu, OUYANG Xiaoting and DENG Qinglu. Preliminary assessment on sustainable utilization of water resources in the Pearl River delta economic zone. Resource Science, 2002, 24(1): 55-61. (in Chinese)
- [19] 邹君. 湖南省水资源可持续利用综合评价研究[J]. 节水灌溉, 2007(2): 18-21.
ZOU Jun. Study on comprehensive evaluation of sustainable utilization of water resource in Hunan province. Water Saving Irrigation, 2007(2): 18-21. (in Chinese)
- [20] 文俊, 金菊良, 王龙, 等. 区域水资源可持续利用预警评价的理论框架探讨[J]. 水利科技与经济, 2006, 12(8): 518-520.
WEN Jun, JIN Juliang, WANG Long, et al. Theory framework of forewarning evaluation for regional water resources sustainable utilization. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2006, 12(8): 518-520. (in Chinese)
- [21] 门宝辉, 梁川, 赵燮京. 评价区域水资源开发利用程度的集对分析法[J]. 南水北调与水利科技, 2003, 1(6): 30-32.

- MEN Baohui, LIANG Chuan and ZHAO Xiejing. Evaluation of regional water resources development and utilization degree of set pair analysis method. *South-to-North Transfers and Water Science & Technology*, 2003, 1(6): 30-32. (in Chinese)
- [22] 陈仁杰, 阚海东. 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.
CHEN Renjie, KAN Haidong. A review of comprehension index methods in water quality assessment. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2009, 26(6): 581-584. (in Chinese)
- [23] 易丽萍, 李俊峰, 范文波. 基于层次分析法的阿克苏地区水资源可持续开发利用评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2007, 18(1): 44-48.
YI Liping, LI Junfeng and FAN Wenbo. Evaluation of sustainable exploitation and utilization of water resources based on analytic hierarchy process (AHP) method in Aksu Region. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2007, 18(1): 44-48. (in Chinese)
- [24] 黄初龙, 邓伟, 杨建锋. 中国东北地区农业水资源利用水平灰色聚类评价[J]. *干旱区研究*, 2006, 23(2): 229-235.
HUANG Chulong, DENG Wei and YANG Jianfeng. Grey clustering evaluation of utilization of agricultural water resources in northeast China. *Arid Zone Research*, 2006, 23(2): 229-235. (in Chinese)
- [25] 赵甲. 基于因子分析法的北京市水资源短缺问题研究[J]. *兰州工业学院学报*, 2013, 20(4): 61-64.
ZHAO Jia. The research of the water shortage in Beijing based on the factor analysis. *Journal of Lanzhou Institute of Technology*, 2013, 20(4): 61-64. (in Chinese)
- [26] 黎枫, 陈亚宁, 李卫红, 孟丽红. 基于熵权的集对分析法在水资源可持续利用评价中的应用——以塔里木河三源流地区为例[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(4): 723-730.
LI Feng, CHEN Yaning, LI Weihong and MENG Lihong. The application of set pair analysis based on entropy weight to evaluation of sustainable water resources utilization—A case study in the three sources of Tarim river. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(4): 723-730. (in Chinese)
- [27] 麻荣永, 郑二伟, 王魁, 等. 基于主成分分析法的广西水资源可持续利用综合评价[J]. *广西大学学报: 自然科学版*, 2008, 33(1): 16-19.
MA Shengrong, ZHENG Erwei, WANG Kui, et al. Application of the main component analysis method in comprehensive evaluation of the water resources sustainable utilization in Guangxi province. *Journal of Guangxi University (Natural Sciences Education)*, 2008, 33(1): 16-19. (in Chinese)
- [28] 杨阳, 方国华, 黄显峰, 等. 基于改进模糊物元分析法的区域最严格水资源管理评价[J]. *水资源保护*, 2014, 30(6): 19-24.
YANG Yang, FANG Guohua, HUANG Xianfeng, et al. Assessment of strictest regional water resources management system based on improved fuzzy matter-element analysis. *Water Resource Protection*, 2014, 30(6): 19-24. (in Chinese)
- [29] 李立铮, 董增川, 牛俊. 物元可拓模型在水资源可持续利用评价中的应用[J]. *水电能源科学*, 2007, 25(5): 1-4.
LI Lizheng, DONG Zengchuan and NIU Jun. Application of element extension model to evaluation water resources sustainable utilization. *Water Resources and Power*, 2007, 25(5): 1-4. (in Chinese)
- [30] 李俊晓, 李朝奎, 罗淑华, 等. 基于 AHP-模糊综合评价方法的泉州市水资源可持续利用评价[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(1): 040.
LI Xiaojun, LI Chaokui, LUO Shuhua, et al. Sustainable utilization evaluation of water resources in Quanzhou city based on AHP and fuzzy synthetic judgment. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(1): 040. (in Chinese)
- [31] 王栋. 基于最大熵原理的水环境模糊优化评价模型[J]. *河海大学学报, 自然科学版*, 2002, 30(6): 56-60.
WANG Dong. POME-based fuzzy optimal evaluation model of water environment. *Journal of HOHEL University (Natural Sciences)*, 2002, 30(6): 56-60. (in Chinese)
- [32] 李恩宽, 梁川. 密切值法在水环境质量综合评价中的应用[J]. *云南水力发电*, 2005, 21(3): 9-10, 17.
LI Enkuan, LIANG Chuan. Application of the oscillating value method to water environment quality assessment. *Yunnan Water Power*, 2005, 21(3): 9-10, 17. (in Chinese)
- [33] 程瑶, 孙倩, 马建琴, 等. 区域水资源可持续利用系统评价的模糊对向传播神经网络模型[J]. *水文*, 2008, 28(1): 28-31.
CHENG Yao, SUN Qian, MA Jianqin, et al. A fuzzy counter-propagation neural network model to assess local sustainable water resources system. *Journal of China Hydrology*, 2008, 28(1): 28-31. (in Chinese)
- [34] 刘丹丹, 冯利华, 王宁. 基于反向传播神经网络的区域水资源需求量预测——以金华市为例[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2011, 37(2): 231-236.
LIU Dandan, FENG Lihua and WANG Ning. Regional water demand prediction based on back propagation neural network: Case of Jinhua city. *Journal of Zhejiang University (Agricultural & Life Science)*, 2011, 37(2): 231-236. (in Chinese)
- [35] 崔东文, 郭荣. 基于 GRNN 模型的区域水资源可持续利用评价——以云南文山州为例[J]. *人民长江*, 2012, 43(5): 26-31.
CUI Wendong, GUO Rong. Evaluation of sustainable utilization of regional water resources based on GRNN neural network model: Case of Wenshan prefecture of Yunnan province. *Yangtze River*, 2012, 43(5): 26-31. (in Chinese)
- [36] 金菊良, 刘永芳, 丁晶, 等. 投影寻踪模型在水资源工程方案优选中的应用[J]. *系统工程理论方法应用*, 2004, 13(1): 81-84.

- JIN Juliang, LIU Yongfang, DING Jing, et al. Application of projection pursuit model to optimal choice of water resources engineering schemes. *Systems Engineering Theory Methodology Applications*, 2004, 13(1): 81-84. (in Chinese)
- [37] 王壬, 陈兴伟, 陈莹, 等. 基于粗糙集和突变级数法的区域水资源可持续利用评价[J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12(5): 77-83.
WANG Ren, CHEN Xingwei, CHEN Ying, et al. Sustainable utilization evaluation of regional water resources based on rough set theory and catastrophe progression method. *Science of Soil and Water Conservation*, 2014, 12(5): 77-83. (in Chinese)
- [38] 赵晓莉, 李祚泳, 丁晶. 改进型量子遗传算法应用于区域水资源可持续利用评价[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(6): 980-985.
ZHAO Xiaoli, LI Zuoyong and DING Jing. Application of improved quantum genetic algorithm to the evaluation of sustainable utilization of regional water resources. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(6): 980-985. (in Chinese)
- [39] 门宝辉, 梁川. 水质量评价的物元分析法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2003, 35(3): 358-361.
MEN Baohui, LIANG Chuan. Matter element method for evaluating water quality. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2003, 35(3): 358-361. (in Chinese)
- [40] 门宝辉, 梁川. 水资源开发利用程度综合评价的可拓方法[J]. *水电能源科学*, 2002, 20(4): 66-69.
MEN Baohui, LIANG Chuan. Extension method for comprehensive evaluation on development utilization of water resources. *International Journal Hydroelectric Energy*, 2002, 20(4): 66-69. (in Chinese)