

流域水资源安全利用评估模型及应用综述

左倩云¹, 周李磊^{2*}

¹重庆欣荣土地房屋勘测技术研究有限责任公司, 重庆

²重庆交通大学土木工程学院, 重庆

收稿日期: 2022年2月14日; 录用日期: 2022年4月12日; 发布日期: 2022年4月29日

摘要

水资源安全评价是制定保障体系和决策的前提和依据。本文综述流域水资源安全评价模型及其应用, 主要包括2个方面: 水资源安全的理论研究及水资源安全评价模型及其应用。现有研究主要有3点不足: 缺乏统一规范的评价模型(包括评价指标的统一和评价方法的统一), 缺乏长时间序列的研究, 缺乏空间尺度研究。最后展望了流域水安全评估模型及其应用前景, 以期推动开展流域水资源安全评价, 为流域水资源可持续管理提供理论支撑。

关键词

流域水资源, 安全评价, 评价模型

Review on the Evaluation Model and Application of Basin Water Resources Security

Qianyun Zuo¹, Lilei Zhou^{2*}

¹Chongqing Xinrong Land and Housing Survey Technology Institute Co., Ltd., Chongqing

²School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing

Received: Feb. 14th, 2022; accepted: Apr. 12th, 2022; published: Apr. 29th, 2022

Abstract

Water resources security evaluation is the prerequisite and basis for making water resources security system and decision-making. This study reviewed the water resources security evaluation model and its application, including two aspects: the theoretical study of water resources security and water resources safety evaluation model and its application. There are three shortcomings in the existing research: lack

作者简介: 左倩云(1990-), 女, 四川省安岳县人, 工程师, 硕士研究生, 主要从事国土空间规划、国土资源调查评价与生态修复等相关工作, Email: 770959102@qq.com

*通讯作者 Email: zhoullei2021@cqjtu.edu.cn

文章引用: 左倩云, 周李磊. 流域水资源安全利用评估模型及应用综述[J]. 水资源研究, 2022, 11(2): 200-209.

DOI: 10.12677/jwrr.2022.112022

of unified normative evaluation model (including the unification of evaluation index and evaluation method), lack of long time series and lack of spatial scale. Finally, the water security evaluation and its application are discussed in order to promote the development of water resources security assessment and provide the theoretical support for the sustainable water resources management.

Keywords

River Basin Water Resources, Safety Evaluation, Evaluation Model

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

水资源是人类赖以生存和发展的基础,总量丰富,时空分布不均。水资源安全问题越来越引起人们的注意,尤其在全球化背景下,随着世界人口的快速增长、全球气候变化及社会经济的发展对水资源需求的增加[1] [2],水资源匮乏、水污染严重、洪涝灾害等水资源安全问题日益突出[3]。流域水资源短缺直接影响着区域农作物的灌溉[4] [5],严重的会对人口流动产生重大影响,是地区间暴力冲突、国家之间战争的诱导因素[6];水资源污染直接危害人类身体健康,破坏生态系统;洪涝灾害造成人员伤亡,农作物绝收,经济损失巨大。面对严峻的水资源安全问题,相关学者发出了水资源战争即将爆发的警告[7]。

流域是地球陆地表层生态系统最为发达的地域单元[8]。水资源是流域生态系统发育的关键要素,生态系统的健康直接影响到流域内生物的多样性,流域水资源健康对支撑流域内经济社会的可持续发展、维系良好的生态环境并使之处于正常的健康发展状态有着重要意义[9]。全球气候变化和人类活动“自然-人工”二元干扰下,造成流域内部分河流断流、湖泊萎缩,湿地面积减少、水土流失加剧,流域水环境呈恶化趋势[10],相比于城市水资源安全问题,流域水安全问题受社会、经济、农业、资源、环境等多系统影响,问题更加复杂。

基于此,本文从水资源安全的相关理论、水资源评估模型的指标选取、评价方法以及评价等级标准的确定等方面对区域水资源安全评估模型进行研究,阐述了当前研究中存在的不足,并对流域水资源安全评估研究进行了展望,以期对监控和优化管理流域水资源提供技术支持和理论支撑。

2. 水资源安全理论

“水资源安全”已被不同部门和组织广泛应用,但具体的含义不同,目前,还没有统一确定的定义[11] [12] [13]。2000年荷兰海牙举行的第二届世界水资源论坛和部长会议上,“水资源安全”首次被提出,并被定义为“所有人能以承受的价格获取足够安全的水” [14] [15];从水资源供需平衡角度,水资源安全是指“水资源能否满足人民生活、经济发展和生态保护的要求” [16];从水资源承载力角度,水资源安全是指“水的存在方式及水事活动对人类社会的稳定与发展是无威胁的,或者威胁可以控制在可以承受的范围” [17];从地表水质和水量角度,水资源安全是指“随着人类生产的迅速发展而导致的水循环系统的破坏和水功能的衰退,引起一系列经济、社会和环境问题” [18]。

全球水伙伴关系(The Global Water Partnership)、世界经济论坛(The World Economic Forum)、联合国科教文组织(UNESCO)的水教育研究所(Institute for Water Education)和亚太水论坛(The Asia-Pacific Water Forum)等国际组织对水资源安全的发展起到促进和推动作用,水资源安全是其主要研究课题及峰会议题之一[1] [19] [20] [21],

水教育研究所对水资源安全的定义是“水资源安全包含水系统的可持续利用和保护,防止与水相关的危害(如洪水和干旱),水资源的可持续开发以及保护人类和环境的水功能和服务”[19][22]。

综合考虑社会经济环境因素,水资源安全可以定义为“一个国家或区域在某一具体历史发展阶段,以可以预见的技术、经济和社会水平为依据,以可持续发展为原则,以维护生态环境良性循环为条件,水资源能够满足国民经济和社会可持续发展的需求,水资源的供需达到平衡”[23],即人人都有获得安全用水的设施和经济条件,所获得的水要满足清洁健康、生活生产的需要及自然生态环境需求。

水资源安全包括自然性水资源安全和人为型水资源安全,涉及水资源短缺洪水灾害的水量问题和水体污染导致的水质问题,涵盖了资源、环境、生态、社会、政治、经济等方面。流域水资源的外延如图1所示,包括由水安全引发的经济社会安全和生态环境安全,以及子系统。

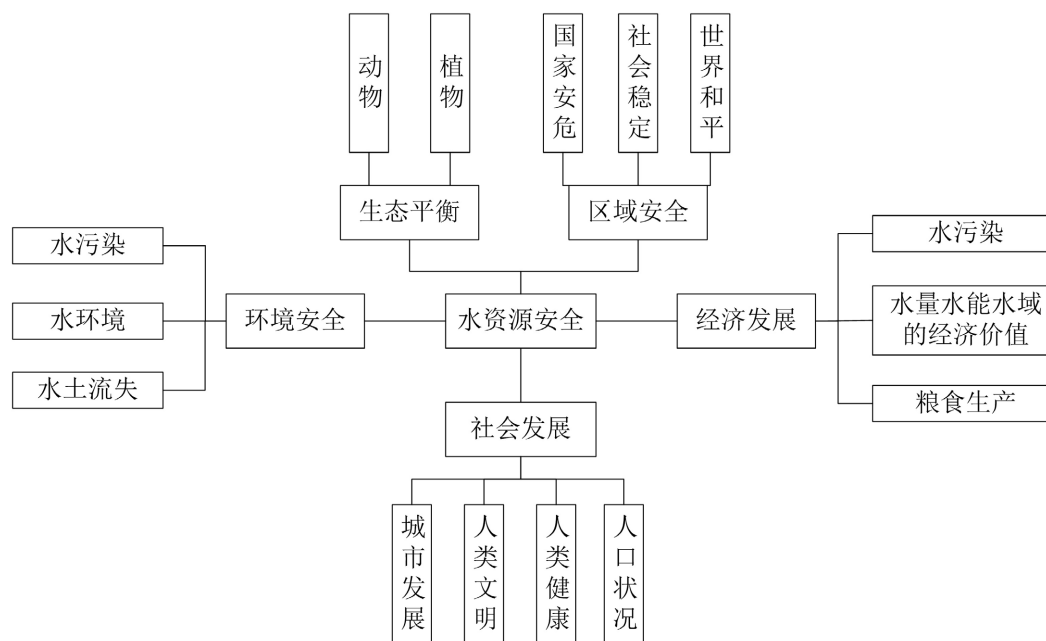


Figure1. Extension diagram of basin water resources security [24]

图1. 流域水资源安全外延关系图(引自参考文献[24])

3. 流域水资源安全评价模型

流域水安全是指流域水量、水质或他们的时空分布与人的合理需求之间的差异超过相应阈值时所产生的各种现象,由于系统复杂涉及到社会、经济、农业、资源和环境系统,如何科学合理的选取评价指标,构建最恰当的评价模型对最终评价结果的可信度有着重大的影响。

3.1. 流域水资源安全评价指标

流域水资源安全评价指标体系没有统一的标准,从不同角度出发,建立的水安全系统的层次结构将不同。

1) 基于水资源安全系统的形成机制

杨操静[25]从水资源安全、水生态环境安全、经济安全和社会安全4个角度建立评价指标体系,对渭河流域进行了水资源安全的评价;吴开亚等[9]将水资源安全划分为水资源安全、水环境安全、水灾害防治安全和社会经济安全4个子系统,对巢湖流域水资源安全进行了7年的评估,结果表明巢湖安全等级值均处于临界安全附近,有逐渐改善的趋势;刘昕[24]则在此基础上增加了饮水安全和管理安全子系统,使评价体系更加完善,并对

关中地区水资源安全进行了评估；梁栩等从水资源、水环境、社会经济 3 个子系统内部互相影响与制约关系角度建立水资源安全系统，对海南岛南渡江水资源安全系统制约因素进行识别，并对影响机理及其演变进行分析[26]。同样的，肖俊[27]、孙月峰[23]、胡昌军[28]等人也分别从生命安全、经济安全、生态环境安全、社会安全、管理安全 5 个子系统建立指标体系，分别对天津、江西和云南文山州的水资源安全进行了全面的评价，为区域水资源管理提供了参考。

2) 基于“驱动力-压力-状态-影响-响应”模型(DPSIR 模型)

DPSIR 模型是对 PSR 模型和 DSR 模型的改进，PSR 模型[29] [30]和 DPSIR 模型[31]都被广泛的运用到水资源安全评价中，陆建忠等[32]根据 PSR 模型构建了综合指数指标体系，对鄱阳湖流域水资源安全进行了评价，结果表明在 2000~2010 年期间鄱阳湖流域水资源安全经历了由一般状态到良好状态，再到一般状态，最后发展为较差状态的过程；苏印等[33]根据 DPSIR 模型建立了喀斯特区域水资源安全的评价指标体系，对贵州水资源安全进行了评价；在此基础上，张凤太等[34]对 DPSIR 模型进行了改进，增加了管理模块(M)，构建了 DPSIRM 模型评价指标体系，也对贵州岩溶区水资源安全进行了评价，结果与水资源安全客观情况相吻合。

3) 基于水资源供需评价

凌红波等[35]根据中国水资源供需分析中的指标体系，选取了生态安全指数，水资源量指数，社会经济指数，供需状况指数 4 个方面，对新疆玛纳斯河流域进行了水资源安全评价，结果表明玛纳斯河流域水资源安全综合评价处于不安全水平，水资源利用率不高、水资源量少，制约了区域社会经济的发展。杨振华等[36]从水资源供需特征考虑，依据水资源安全内涵，构建了“需水压力(P)-工程性缺水(E)-承载状态(S)-生态基础(B)-人为相应(R)”(PESBR 模型)评价指标体系，评价了岩溶地区水资源安全状况。

4) 基于系统动力学模型

水资源安全系统是水资源系统与社会、经济、生态系统相互联系，相互作用、相互交织构成的开放复合系统，选取评价指标和变量更加复杂。综合考虑了水资源、水环境、社会和经济四个子系统，构建系统动力学水资源安全评价模型，王勇[37]对天津水资源安全进行了评价，Cheng Li [38]对苏州水资源承载力进行了评价，梁栩[26]对海南岛南渡江流域水资源安全系统进行了研究。

5) 基于水资源贫困指数

水资源贫困指数(Water Poverty Index, WPI)是 Carolin Sullivan 提出建立的一组综合性指标，定量评价国家或地区间相对缺水程度[39] [40] [41]，由资源(R)、途径(A)、利用(U)、能力(C)和环境(E)5 个分指数构成。武荣和李援农[42]基于水资源贫困指数建立了水资源安全评价指标体系，对松辽河、淮河、黄河、海河、西北诸河、长江、西南诸河、珠江、东南诸河等九大流域和分区的水资源安全进行了评价，结果表明黄河、海河、淮河和长江流域水资源贫困指数较小，开发潜力较小，其他流域和分区水资源贫困指数较大，有一定的开发潜力。

6) 基于风险构成成分

宋晨焯等[43]从致灾因子危险性，承灾体脆弱性，承灾体的防范能力 3 个方面，建立了评价指标体系对黄河流域水资源安全进行了评价，取得较好的成果。

3.2. 流域水资源安全评价方法

1) 层次分析法(AHP)

层次分析法，由美国运筹学家托马斯·塞蒂(T.L. Satty)在 20 世纪 70 年代中期正式提出，它是一种定性和定量相结合的、系统化、层次化的分析方法。高媛媛等采用 $e^{0/5} \sim e^{8/5}$ 对指标的重要性进行比较，不采用传统的 1~9 作为指标重要性标度，改进后的层次分析法在标度精度及均匀度方面优于传统的 AHP 法[15]。

2) 熵值法

熵值反映了信息的无序化程度，可以尽量消除各指标权重的人为干扰，使评价结果更符合客观实际。将熵

值法和 AHP 法相结合[23] [44], 被广泛的应用到水资源安全评价中。

3) 灰色关联法

流域水资源系统复杂, 具有信息不完全的灰色系统, 灰色关联分析理论适宜对灰色系统进行较为准确、动态性的系统分析。池静静[30]、卞建民[45]和张凤太[34]等利用灰色关联法, 分别对北京、松内平原西部区域以及贵州的水资源安全进行了评价。

4) 模糊数学法

模糊综合评判模型主要用来计算各个评价因素对其不同评价等级的隶属度。凌红波等将 AHP 法与模糊数学方法相结合, 对玛纳斯河流域水资源安全进行了评价[35]; Lu Shibao 等基于模糊集(Vague sets)构建了模糊集的相似度量模型并结合 AHP 法和 Delphi 法, 对城市水资源安全进行了评价[46] [47]; 戴明宏等在模糊数学的基础上结合熵权法, 对广西水资源承载力进行了评价[48]。

5) 集对分析法(SPA)

集对分析是赵克勤[49]提出的一种研究不确定系统的系统分析方法, 从同、异、反三个方面研究事物之间的确定性与不确定性。苏印等利用集对分析法对喀斯特区域水资源安全进行了评价[33]; 张凤太等将集对分析和熵权法相结合, 对表层岩溶带“二元”水资源安全进行了评价[50]; 金菊良等在集对分析的基础上结合用于加速遗传的模糊层次分析法, 对巢湖流域水资源安全进行了评价[51]; 陈建忠等也基于集对分析法对鄱阳湖流域水资源安全进行了评价, 取得较好的效果[32]; 贡力和余涛也用集对分析法对区域水安全进行了评价[52], 集对分析法在区域水资源安全评价中具有较好的适用性。

6) 投影寻踪法(PP)

投影寻踪于 1974 年, 由美国斯坦福大学大学的 Friedman 和 Tukey 提出, 是处理和分析高维数据的一类新兴的统计方法, 其基本思想是将高维数据投影到低维(1~3 维)子空间上, 寻找出反映原高维数据的结构或特征的投影, 以达到研究和分析高维数据的目的。吴开亚将投影寻踪进行了改善, 构建了基于变权重和信息熵的投影寻踪评价模型(CWE-PP), 对巢湖流域水资源安全进行了安全评价[53]。

7) 引力指数法

李祚泳[54]提出并建立了一种新的水资源安全评价模型——引力指数公式, 并分析了公式的稳定性和可靠性, 通过实例对比检验了模型的合理性和实用性, 基于指标规范值的水资源系统评价的引力指数公式具有物理意义明确和规范、统一、简洁和通用的特点。

8) 其他方法

其他评价方法包括多目标决策[19]、系统动力学模型[55] [56] [57] [58]、约束随机赋权法[43]、支持向量机分类法(SVM) [59]、人工神经网络模型[60]、双隐层 BP 神经网络模型[28]、基于 PSO 优化的逻辑斯蒂曲线法[29]、物元分析法[61] [62]、云模型[63]、ELECTRE III [64]也被运用到水资源安全评价及水资源管理上, 且取得较好的效果。

4. 流域水资源安全评价模型研究的不足

目前关于流域水资源安全评估模型比较多, 不同的评价方法都在不同流域都有着很好的应用, 且水资源安全评价的结果, 对流域水资源的管理有着重要的指导作用, 但研究上还有一些不足。

1) 缺乏统一的评价模型

无论是评价指标还是评价方法的确定上, 都缺乏一个统一的标准, 导致不同学者不同流域的评价结果不能进行比较, 现有评价模型的适用性有限, 众多模型研究与我国现有最严格水资源管理的三条红线、四项制度、江河(湖库)生态流量(水位)等应用产生脱节, 许多前沿的研究未引入或如何引入或如何形成一套系统完整的新的理论方法支撑水资源安全有待进一步实践。

同时,随着全球气候的变化,降水和气温变化剧烈,影响着水资源及粮食生产的安全[65][66],随着人口的增加,经济的发展,流域需水量巨大,如何应对这些变化,保证区域水资源的安全,亟需适应性更好的水资源安全评价模型。

在全球化背景下,构建统一的评价模型有利于比较不同流域的水资源安全状况,有针对性的制定相应的政策,实现流域水资源的可持续利用与科学管理。

2) 时间尺度研究不足

流域水资源安全评价模型所构建的评价指标体系,其历史数据获取受限,导致流域水资源安全评价模型的时间尺度研究不足,目前,流域水资源评价都是2000年以后的评价,缺乏2000年以前的研究。长时间序列的研究缺乏,使流域水资源安全规律性的现象呈现不出来,很难根据现有的评价结果预测未来的流域水资源安全的变化,以及深度挖掘隐藏在变化现象背后的影响机制。

3) 空间尺度研究不足

目前,流域水资源安全评价的结果缺乏空间化表达,应加强水资源三级区安全评价,使水资源评价的结果空间化到更小的区域,方便小尺度小区域的管理与维护,提高水资源管理精细化水平。

5. 流域水资源安全评价模型应用展望

维持流域水资源安全,实现水资源可持续利用,社会经济稳定发展,还需要面对很多挑战。实时准确的对流域水资源安全进行定量评价,对进一步提高流域水资源可持续发展利用水平、优化产业结构、缓解水资源供需矛盾具有重要意义。

随着科学技术的发展,不同学科的融合,未来一定会在流域水资源评价模型上取得突破,同时随着人们对环保意识的增强,政府对水资源管理的重视,在当前气候变化、人口快速增长、经济快速发展的背景下,可以实现流域水资源安全可持续利用。

参考文献

- [1] COOK, C., BAKKER, K. Water security: Debating an emerging paradigm. *Global Environmental Change*, 2012, 22(1): 94-102. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.10.011>
- [2] JIANG, Y. China's water security: Current status, emerging challenges and future prospects. *Environmental Science & Policy*, 2015, 54: 106-125. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.06.006>
- [3] MCINTOSH, A., PONTIUS, J. Chapter 2. Global Water Resources. In *Case studies for integrating science and the global environment*. Boston: Elsevier, 2017: 113-254. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801712-8.00002-0>
- [4] SINGH, A. Hydrological problems of water resources in irrigated agriculture: A management perspective. *Journal of Hydrology*, 2016, 541, Part B: 1430-1440. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.044>
- [5] MALEKIAN, A., HAYATI, D. and AARTS, N. Conceptualizations of water security in the agricultural sector: Perceptions, practices, and paradigms. *Journal of Hydrology*, 2017, 544: 224-232. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.026>
- [6] PACINI, N., HARPER, D. M. Hydrological characteristics and water resources management in the Nile Basin. *Ecology & Hydrobiology*, 2016, 16(4): 242-254. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2016.09.001>
- [7] HARRINGTON, C. Fluid identities: Toward a critical security of water. *Electronic Thesis and Dissertation Repository Paper 1716*, 2013.
- [8] 张雷, 鲁春霞, 吴映梅, 等. 中国流域水资源综合开发[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(2): 295-303.
ZHANG Lei, LU Chunxia, WU Yingmei, et al. An overall development of water resources for China's rivers. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(2): 295-303. (in Chinese)
- [9] 吴开亚, 金菊良, 魏一鸣, 等. 基于指标体系的流域水安全诊断评价模型[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2008, 47(4): 105-113.
WU Kaiya, JIN Juliang, WEI Yiming, et al. Diagnosis assessment model of watershed water security based on index system. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2008, 47(4): 105-113. (in Chinese)
- [10] FRAITURE, C. D., GIORDANO, M., LIAO, Y. S., et al. Biofuels and implications for agricultural water uses: Blue impacts of green energy. *Water Policy*, 2008, 10(S1): 67-81. <https://doi.org/10.2166/wp.2008.054>

- [11] WANG, X., MA, F. B. and LI, J. Y. Water resources vulnerability assessment based on the parametric-system method: A case study of the Zhangjiakou Region of Guanting Reservoir basin, North China. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 1204-1212. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.114>
- [12] EL-SADEK, A. Virtual water trade as a solution for water scarcity in Egypt. *Water Resources Management*, 2010, 24(11): 2437-2448. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9560-9>
- [13] XIA, J., ZHANG, L., LIU, C., et al. Towards better water security in North China. *Water Resources Management*, 2007, 21(1): 233-247. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9051-1>
- [14] LIU, B.-C., MEI, X.-R., LI, Y.-Z., et al. The connotation and extension of agricultural water resources security. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(1): 11-16. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(07\)60011-X](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(07)60011-X)
- [15] 高媛媛, 王红瑞, 许新宜, 等. 水资源安全评价模型构建与应用——以福建省泉州市为例[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(2): 204-214.
GAO Yuanyuan, WANG Hongrui, XU Xinyi, et al. Assessment of water resources security: Case of Quanzhou city in Fujian Province. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(2): 196-203. (in Chinese)
- [16] 贾绍凤, 张士锋. 海河流域水资源安全评价[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(4): 379-387.
JIA Shaofeng, ZHANG Shifeng. Water resources security appraisalment of Haihe River basin. *Progress in Geography*, 2003, 22(4): 379-387. (in Chinese)
- [17] 张翔, 夏军, 贾绍凤. 水安全定义及其评价指数的应用[J]. *资源科学*, 2005, 27(3): 145-149.
ZHANG Xiang, XIA Jun and JIA Shaofeng. Definition of water security and its assessment using water poverty index. *Resources Science*, 2005, 27(3): 145-149. (in Chinese)
- [18] 焦士兴, 李俊民. 中国水资源安全的现状分析与对策研究[J]. *新乡师范高等专科学校学报*, 2003(2): 26-28.
JIAO Shixing, LI Junmin. The present analysis and countermeasures of water resource in China. *Journal of Xinxiang Teachers College*, 2003(2): 26-28. (in Chinese)
- [19] WANG, X., CUI, Q. and LI, S. Y. An optimal water allocation model based on water resources security assessment and its application in Zhangjiakou region, northern China. *Resources, Conservation and Recycling*, 2012, 69: 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.005>
- [20] Un-Ihe. Research themes. *Water, Food & Energy Security*, 2022. <https://www.un-ihe.org/research-themes/water-food-energy-security>
- [21] FORUM, A. P. W. Asia-Pacific water summit. Beppu, 2007.
- [22] KC, B., SCHULTZ, B. and PRASAD, K. Water management to meet present and future food demand. *Irrigation & Drainage*, 2011, 60(3): 348-359. <https://doi.org/10.1002/ird.584>
- [23] 孙月峰, 张表志, 闫雅飞, 等. 基于熵权的城市水资源安全模糊综合评价研究[J]. *安全与环境学报*, 2014(1): 87-91.
SUN Yuefeng, ZHANG Biaozhi, YAN Yafei, et al. Fuzzy comprehensive assessment model for the urban water resource safety assessment based on the entropy weight. *Journal of Safety and Environment*, 2014(1): 87-91. (in Chinese)
- [24] 刘昕. 区域水安全评价模型及应用研究[D]: [博士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
LIU Xin. Research on regional water security assessment model and its application. Ph.D. Thesis, Yangling: Northwest A&F University, 2011. (in Chinese)
- [25] 杨操静. 水安全评价及其在渭河中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2007.
YANG Caojing. Study on the water security assessment and its application in Wei River. Master's Thesis, Xi'an: Chang'an University, 2007. (in Chinese)
- [26] 梁栩, 朱丽蓉, 林尤文, 叶长青. 海南岛南渡江流域水资源安全系统影响机理及演变研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(8): 101-109.
LIANG Xu, ZHU Lirong, LIN Youwen, et al. Influence mechanism and evolution of water resources security system in Nandu River Basin. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(8): 101-109. (in Chinese)
- [27] 肖俊. 江西省水资源安全评价[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2008.
XIAO Jun. The safety evaluation on water resources of Jiangxi Province. Master's Thesis, Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2008. (in Chinese)
- [28] 胡昌军. 双隐层 BP 神经网络模型在区域水安全评价中的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(3): 196-200.
HU Changjun. Application of two-hidden layer BP neural network model in evaluation of regional water safety. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2013, 24(3): 196-200. (in Chinese)
- [29] 宋培争, 汪嘉杨, 刘伟, 等. 基于 PSO 优化逻辑斯蒂曲线的水资源安全评价模型[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(5): 886-893.
SONG Peizheng, WANG Jiayang, LIU Wei, et al. Water security evaluation model based on the logistic curve optimized by particle swarm optimization. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(5): 886-893. (in Chinese)
- [30] 池静静, 陈彬. 基于 TOPSIS 的灰色关联法在水资源安全评价中的应用研究[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(2): 155-159.

- CHI Jingjing, CHEN Bin. Application of TOPSIS based grey correlation analysis in integrated water resource security evaluation. *Bulletin of Soil and Water Conservation*. 2009, 29(2): 155-159. (in Chinese)
- [31] GENG, Q., WU, P., ZHAO, X., et al. A framework of indicator system for zoning of agricultural water and land resources utilization: A case study of Bayan Nur, Inner Mongolia. *Ecological Indicators*, 2014, 40: 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.01.003>
- [32] 陆建忠, 崔肖林, 陈晓玲. 基于综合指数法的鄱阳湖流域水资源安全评价研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(2): 212-218.
LU Jianzhong, CUI Xiaolin and CHEN Xiaoling. Assessment of water resource security in Poyang Lake Watershed based on composite index method. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(2): 212-218. (in Chinese)
- [33] 苏印, 官冬杰, 苏维词. 基于 SPA 的喀斯特地区水安全评价——以贵州省为例[J]. *中国岩溶*, 2015, 34(6): 560-569.
SU Yin, GUAN Dongjie and SU Weici. The assessment of water security in Karst region by SPA model: A case study of Guizhou Province. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(6): 560-569. (in Chinese)
- [34] 张凤太, 王腊春, 苏维词. 基于 DPSIRM 概念框架模型的岩溶区水资源安全评价[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(11): 3511-3520.
ZHANG Fentai, WANG Lachun and SU Weici. The safety evaluation of water resources based on DPSIRM conceptual framework in karst region. *China Environmental Science*, 2015, 35(11): 3511-3520. (in Chinese)
- [35] 凌红波, 徐海量, 乔木, 等. 基于 AHP 和模糊综合评判的玛纳斯河流域水资源安全评价[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(4): 989-994.
LING Hongbo, XU Hailing, QIAO Mu, et al. Appraisal of water resource security in Manasi river basin by analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(4): 989-994. (in Chinese)
- [36] 杨振华, 苏维词, 李威. 基于 PESBR 模型的岩溶地区城市水资源安全评价——以贵阳市为例[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 34(5): 1-9.
YANG Zhenhua, SU Weici and LI Wei. Safety assessment of urban water resources in karst area based on PESBR Model—A case study of Guiyang City. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2016, 34(5): 1-9. (in Chinese)
- [37] 王勇. 天津市水资源系统安全仿真与评价[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2012.
WANG Yong. Simulation & evaluation of water resources security in Tianjin. Master's Thesis, Beijing: North China Electric Power University, 2012. (in Chinese)
- [38] CHENG, L. System dynamics model of Suzhou water resources carrying capacity and its application. *Water Science and Engineering*, 2010, 3(2): 144-155.
- [39] SULLIVAN, C. The potential for calculating a meaningful water poverty index. *Water International*, 2001, 26(4): 471-480. <https://doi.org/10.1080/02508060108686948>
- [40] SULLIVAN, C. Calculating a water poverty index. *World Development*, 2002, 30(7): 1195-1210. [https://doi.org/10.1016/S0305-750X\(02\)00035-9](https://doi.org/10.1016/S0305-750X(02)00035-9)
- [41] SULLIVAN, C., MEIGH, J. and LAWRENCE, P. Application of the water poverty index at different scales: A cautionary tale. *Water International*, 2009, 31(3): 412-426. <https://doi.org/10.1080/02508060608691942>
- [42] 武荣, 李援农. 基于层次分析法的水资源安全模糊综合评价模型及其应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(4): 139-144+150.
WU Rong, LI Yuannong. Application of fuzzy assessment model of water resources security based on AHP. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2013, 24(4): 139-144+150. (in Chinese)
- [43] 宋晨焯, 张韧, 周爱霞, 等. 黄河流域水资源安全风险评价[C]//第三届中国西部风险分析与风险管理学术研讨会. 阿姆斯特丹: 亚特兰蒂斯出版社, 2013: 88-89.
SONG Chenye, ZHANG Ren, ZHOU Aixia, et al. Water resource security risk assessment in Huanghe basin. Proceedings of the third symposium of risk analysis and risk management in western China. Amsterdam: Atlantis Press, 2013: 88-89. (in Chinese)
- [44] 孙才志, 迟克续. 大连市水资源安全评价模型的构建及其应用[J]. *安全与环境学报*, 2008, 8(1): 115-118.
SUN Caizhi, CHI Kexu. Establishment and application of the assessment model for water resources safety in Dalian. *Journal of Safety and Environment*, 2008, 8(1): 115-118. (in Chinese)
- [45] 卞建民, 汤洁, 林年丰, 等. 松嫩平原西部水资源安全研究[J]. *水利水电技术*, 2005(11): 5-7.
BIAN Jianmin, TANG Jie, LIN Nianfeng, et al. Study on water resources security for western part of Songnen Plain. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2005(11): 5-7. (in Chinese)
- [46] LU, S., BAO, H. and PAN, H. Urban water security evaluation based on similarity measure model of vague sets. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(35): 15944-15950. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.007>
- [47] LU, S., WANG, J. and BAO, H. Study on urban water security evaluation based on the vague set similarity model. *Energy Procedia*, 2016, 88: 309-312. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.144>
- [48] 戴明宏, 王腊春, 魏兴萍. 基于熵权的模糊综合评价模型的广西水资源承载力空间分异研究[J]. *水土保持研究*, 2016,

- 23(1): 193-199.
DAI Minghong, WANG Lachun and WEI Xingping. Spatial difference of water resource carrying capacity of Guangxi using fuzzy comprehensive evaluation model based on entropy weight method. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(1): 193-199. (in Chinese)
- [49] 赵克勤. 试论集对分析与模糊数学的关系[C]//模糊数学和系统成果会论文集. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1991: 310-311.
HAO Keqin, On the relationship between set pair analysis and fuzzy mathematics. In *Proceedings of the symposium on fuzzy mathematics and Systems*. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 1991: 310-311. (in Chinese)
- [50] 张凤太, 王腊春, 苏维词, 等. 基于熵权集对耦合模型的表层岩溶带“二元”水资源安全评价[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(6): 70-76.
ZHANG Fengtai, WANG Lachun, SU Weici, et al. Evaluation on the safety of epikarst dualistic water resources by coupling model of entropy weight set pair. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(6): 70-76. (in Chinese)
- [51] 金菊良, 吴开亚, 魏一鸣. 基于联系数的流域水安全评价模型[J]. *水利学报*, 2008, 39(4): 401-409.
JIN Juliang, WU Kaiya and WEI Yiming. Evaluation model of watershed water security based on connection number. *Journal of Water Conservancy*, 2008, 39(4): 401-409. (in Chinese)
- [52] 贡力, 余涛. 集对分析法在水安全评价中的应用[J]. *中国农村水利水电*, 2015(1): 58-62+67.
GONG Li, YU Tao. The application of set pair-analysis method in water security evaluation. *China Rural Water and Hydropower*, 2015(1): 58-62+67. (in Chinese)
- [53] 吴开亚, 金菊良. 基于变权重和信息熵的区域水资源安全投影寻踪评价模型[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(9): 1085-1091.
WU Kaiya, JIN Juliang. Projection pursuit evaluation model of regional water resources security based on variable weight and information entropy. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(9): 1085-1091. (in Chinese)
- [54] 李祚泳, 张小丽, 汪嘉杨, 等. 指标规范值表示的水资源系统评价的引力指数公式[J]. *水利学报*, 2015, 46(7): 792-801+810.
LI Zuoyong, ZHANG Xiaoli, WANG Jiayang, et al. The gravity index formula of water resource system evaluation represented by index specification value. *Journal of water conservancy*, 2015, 46(7): 792-801+810. (in Chinese)
- [55] HASSANZADEH, E., ELSHORBAGY, A., WHEATER, H., et al. Managing water in complex systems: An integrated water resources model for Saskatchewan, Canada. *Environmental Modelling & Software*, 2014, 58: 12-26.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.03.015>
- [56] ZHOU, Y., GUO, S., XU, C.-Y., et al. Integrated optimal allocation model for complex adaptive system of water resources management (I): Methodologies. *Journal of Hydrology*, 2015, 531, Part 3: 964-976.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.007>
- [57] KOTIR, J. H., SMITH, C., BROWN, G., et al. A system dynamics simulation model for sustainable water resources management and agricultural development in the Volta River Basin, Ghana. *Science of the Total Environment*, 2016, 573: 444-457.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.081>
- [58] SUN, Y., LIU, N., SHANG, J., et al. Sustainable utilization of water resources in China: A system dynamics model. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142, Part 2: 613-625. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.110>
- [59] 畅明琦, 刘俊萍, 马惟. 基于支持向量机的水资源安全评价[J]. *自然灾害学报*, 2011, 20(6): 167-171.
CHANG Mingqi, LIU Junping and MA Wei. Water resources security assessment based on support vector machine. *Journal of natural disasters*, 2011, 20(6): 167-171. (in Chinese)
- [60] 刘丽颖, 官冬杰, 杨清伟, 苏维词. 基于人工神经网络的喀斯特地区水资源安全评价[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(2): 207-214.
LIU Liying, GUAN Dongjie, YANG Qingwei and SU Weici. Assessment of water resources security in Karst area based on artificial neural network. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(2): 207-214. (in Chinese)
- [61] 李凤英, 王让会, 黄俊芳, 等. 中国西部地区水安全的多指标物元综合评价[J]. *干旱区研究*, 2006, 23(2): 269-274.
LI Fengying, WANG Ranghui, HUANG Junfang, et al. Multi-index matter-element comprehensive evaluation of water security in western China. *Arid Zone Research*, 2006, 23(2): 269-274. (in Chinese)
- [62] 李如忠. 模糊物元模型在区域水安全评价中的应用[J]. *水土保持研究*, 2005, 12(5): 221-223.
LI Ruzhong. Fuzzy matter element model and its application to water security evaluation. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(5): 221-223. (in Chinese)
- [63] 黄显峰, 赵梦婷, 方国华, 金国裕. 基于组合权重云模型的水资源安全评价模型[J]. *水利经济*, 2021, 39(5): 60-65+82.
HUANG Xianfeng, ZHAO Mengting, FANG Guohua and JIN Guoyu. Water resources security evaluation model based on combined weight cloud model. *Journal of Economics of Water Resources*, 2021, 39(5): 60-65+82. (in Chinese)
- [64] 黄微尘, 余朕天, 李春晖, 李慧. 基于 ELECTRE III 的淮河流域水资源安全评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(1): 20-25.
HUANG Weichen, YU Zhentian, LI Chunhui and LI Hui. The assessment of water resources security in Huaihe river basin

- based on ELECTRE III. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 20-25. (in Chinese)
- [65] CHIARELLI, D. D., DAVIS, K. F., RULLI, M. C., et al. Climate change and large-scale land acquisitions in Africa: Quantifying the future impact on acquired water resources. *Advances in Water Resources*, 2016, 94: 231-237. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.05.016>
- [66] MELKONYAN, A. Climate change impact on water resources and crop production in Armenia. *Agricultural Water Management*, 2015, 161: 86-101. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.004>