

广义水资源高效利用核算

裴源生¹, 赵 勇¹, 张金萍^{1,2}, 秦长海¹

(1. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100044; 2. 郑州大学水利与环境学院, 河南 郑州 450052)

摘要: 广义水资源高效利用核算是从更广泛的视角进行区域/流域尺度的水资源核算, 以水资源循环模拟揭示区间、行业、部门间的水利联系为基础, 在核算水源上为广义水资源; 在核算对象上为区域自然生态系统和人工系统; 在核算指标上包括行业、部门和区域的广义水资源利用效率和效益。界定了不同用户蒸发蒸腾消耗水分的高效和低效部分, 提出了包括人工系统和天然生态系统的不同用户、不同部门和区域整体的广义水资源利用核算指标体系。以宁夏平原区为例, 进行了现状区域广义水资源利用效用核算研究。

关 键 词: 广义水资源; 效率; 效益; 核算

中图分类号: TV213.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-6791(2009)04-0507-06

水资源的高效利用是水资源规划与管理主要目的, 体现在水资源利用的高效率和高效益, 即提高区域整体用水效率, 增加单方水的经济与生态产出。由于农业用水的重要性和保障粮食安全的战略意义, 国内外水资源利用效率与效益核算重点是围绕农业用水开展研究, 始终把提高灌溉水及雨水利用率、作物水分生产效率和单方水产出效益作为农业水资源高效利用的重点, 但对农业水资源利用效率和效益的核算研究主要局限于单株作物和农田尺度, 缺乏宏观区域尺度广义水资源高效利用核算的相关研究。工业和其它产业用水效率与效益的研究相对较少, 即便有相关的研究, 也只是针对具体节水措施所引起的用水效率与效益的变化, 或者对具体用水措施的工程效益评价、财务评价和国民经济评价, 缺乏对宏观区域用水效率与效益的整体评判^[1-4]。

区域/流域是一个整体, 区域/流域广义水资源高效利用核算需要考虑区域内部不同部门、不同区间的水利联系, 但目前系统的区域/流域水资源高效利用定量核算理论与方法还没有形成, 主要存在4方面不足: 核算水源不全面, 仅考虑人工系统可控的地表地下水, 而没有考虑包括降水产生土壤水在内的广义水资源利用效率和效益; 在核算对象上不系统, 主要是进行人工系统的生活、工业、农业用水核算, 没有进行包括自然生态系统在内的整个区域水资源利用效率和效益核算; 水资源效用核算侧重于水资源利用中的某一环节, 没有考虑水资源循环转化在区域、行业和部门之间的有机联系, 围绕水资源利用全过程的效率和效益考察和研究不够; 小尺度单项研究较多, 缺乏区域/流域大尺度综合核算评价研究。

1 广义水资源高效利用核算内涵

广义水资源是指通过天然水循环不断补充和更新, 对人工系统和天然系统具有效用的淡水资源, 其来源于降水, 赋存形式为地表水、土壤水和地下水。自然状态下水资源可以由生态系统直接利用, 或者被开发利用进入经济社会系统, 改善区域生态环境、促进经济发展和提高人类生存质量。除了航运、发电等之外, 水资源利用主要体现在资源消耗方面, 利用过程主要表现为两种途径: 一是被生命体消耗或产品带走, 二是表现为通过

收稿日期: 2008-07-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2006CB403405); 国家自然科学基金资助项目(50709043)

作者简介: 裴源生(1948-), 男, 山西灵石人, 教授级高级工程师, 主要从事水资源高效利用和合理配置研究。

E-mail: peiysh@iwhr.com

通讯作者: 赵 勇, E-mail: zhaoyong@iwhr.com

蒸散发的形式参与到经济和生态量的产出过程中。广义水资源利用效益体现在经济、社会和生态 3 个方面。

以往水资源利用核算主要针对于微观的、部门的、行业的研究，并没有进行包括降水产生的土壤水在内的广义水资源和天然生态系统的利用核算。广义水资源高效利用核算是从更广泛的视角进行区域/流域尺度的水资源核算，以广义水资源循环转化模拟分析揭示区间、行业、部门间的水利联系，在核算水源上包括降水产生的土壤水在内的广义水资源；在核算对象上包括自然生态系统和人工系统的区域整体；在核算指标上包括行业、部门和整个区域的广义水资源利用效率和效益。

广义水资源利用效率核算是以区域水循环模拟为基础，分析广义水资源的利用、消耗和运移转化过程，面向区域天然生态系统与人工系统，以广义水资源利用的消耗量为核算依据，研究天然生态系统、人工系统不同行业和整个区域的广义水资源利用效率。传统水资源利用效益评价往往采用经济量化的方法，随着水资源利用问题研究不断深入，水资源利用效益评价逐步延伸到社会效益和生态效益核算领域，形成了广义水资源利用效益核算，使水资源利用效益核算内容更加系统完善，这就要求在水资源的开发利用过程中，合理衡量经济、社会与生态之间的利用关系。

2 广义水资源利用效率界定

自然状态下，水资源利用与消耗并无有效与无效、高效与低效的区分，所谓的无效、有效、高效和低效之分是根据人们意愿划分的结果，并随着人的认识发生变化，不同的社会群体、不同的研究方法和思考方式，往往会产生不同的水资源利用效用界定结果。以往多从与人类经济社会系统利用紧密程度的角度，将水资源利用与消耗分为有效和无效部分^[5]，但广义水资源高效利用评价认为，人工系统和天然系统水资源利用消耗并没有无效的水量，一切水分都是有效的，但不同的利用过程产生不同的效用。经济系统用水产生经济效用，生态系统用水产生生态效用，根据经济系统和生态系统各自消耗水分产生效用的大小，可以将水资源利用消耗分为高效和低效两类。在水资源服务于经济系统和生态系统的过程中，人们希望尽量减少低效水分利用，增加高效利用。

自然生态系统蒸腾蒸发消耗水量可分为 4 类：降水产生的植物冠层截留蒸发、植被蒸腾、土面蒸发和水面蒸发。根据不同土地利用的蒸发蒸腾服务于人工系统和天然系统效率进行水资源利用的高效和低效划分，如表 1 所示。

表 1 广义水资源利用消耗效率界定

Table 1 Definition of generalized water resources consumption efficiency

一级类型		二级类型		广义水资源消耗效率界定
编号	名称	编号	名称	
1	耕地	11	水田	植被截留腾发和植被蒸腾为高效率，其余为低效率
		12	旱地	
		21	有林地	
2	林地	22	灌木林	植被截留腾发和蒸腾为高效率，其余为低效率
		23	疏林地	
		24	其它林地	
		31	高覆盖度草地	
3	草地	32	中覆盖度草地	
		33	低覆盖度草地	
4	水域	41	河渠	渠道为低效率，河道为高效率
		42	湖泊	高效率
		43	水库坑塘	低效率
		44	永久性冰川雪地	低效率
		45	滩涂	高效率
		46	滩地	高效率
5	城乡、工矿、居民用地	51	城镇用地	降水蒸发和人工生活生产消耗为高效
		52	农村居民点	
		53	其它建设用地	

续表 1

一级类型		二级类型		广义水资源消耗效率界定
编号	名称	编号	名称	
6	未利用土地	61	沙地	低效率
		62	戈壁	低效率
		63	盐碱地	低效率
		64	沼泽地	高效率
		65	裸土地	低效率
		66	裸岩石砾地	低效率
		67	其它	低效率

对于耕地、林地和草地等植被来说，植被冠层截留蒸发有利于降低植物表面和体内温度，是维护正常生理需要，界定为高效水量；植被蒸腾直接参与生物量产出过程，尤其是对于农作物而言，蒸腾直接决定着粮食产量，因此也界定为高效水量；裸土蒸发虽对植物生长环境起着一定的调节作用，但是从生物产出量出发，认为其是低效消耗。居工地降水蒸发可以起到降温湿润的作用，有利于人们身心健康，居工地上生活生产消耗水量是人们从事经济社会活动所必需和必要的，因此被界定为高效水量。

天然河流、湖泊、滩涂、滩地以及沼泽地是维系区域生态系统健康的关键组成部分，不仅可以维持生物多样性，丰富景观生态，提供休闲娱乐，同时也具有一定的防洪、固岸等水文作用，因此这部分水量被界定为高效水量；而永久性冰川雪地和沙地、戈壁、盐碱地、裸土地、裸岩石砾地等其它未利用地被界定为低效水量。

人工水库坑塘和沟渠等水域不同于天然水域系统，人工水域的修建可能阻断了原有的生物链，影响了原有水体状态，并且其建造的目的多是为了生产和生活供水，而这些水域的蒸发消耗未能参与到社会经济活动中去，因此被界定为低效消耗水量。

3 广义水资源高效利用核算指标体系

由于人工系统和自然生态系统广义水资源利用效率和效益无法公度，难以统一核算衡量，并且行业、部门和区域的水资源利用效率与效益也存在着显著的差别，因此，广义水资源高效利用核算分为行业和区域效率和效益两个方面。在此基础上，分别进行人工系统、自然系统以及区域整体的广义水资源高效利用核算。目前水资源利用核算主要集中于水资源的利用上，而从资源短缺的现状来看，构建基于资源消耗的评价指标更加迫切，因此，区域/流域广义水资源利用效率核算指标采用广义水资源消耗量在各自系统水资源利用与消耗中的比率来反映；广义水资源利用效益采用广义水资源利用过程中产生的经济与生态效益与相应的广义水资源消耗比率来反映。

3.1 广义水资源利用效率核算指标

(1) 人工系统广义水资源利用效率核算指标 人工系统广义水资源利用包括生活、工业和农业用水 3 个方面。由于水资源利用行为、利用结构、利用方式、利用水平以及人们重视程度的不同，生活用水、工业用水和农业用水在水资源的利用效率存在着很大差异，因而需要不同的评价指标和方法。生活和工业广义水资源利用效率分别采用生活和工业水资源利用率指标，农业广义水资源利用效率采用农业高效耗水率、农业水资源利用率和农业广义水资源利用率 3 个指标来核算。农业高效耗水率用来核算农业广义水资源消耗量中高效消耗比率，农业用水的高效和低效部分根据表 1 进行划分；农业水资源利用率表征农业灌溉用水的利用效率，以分析农业输配水系统、作物蒸腾与裸间土壤蒸发过程中消耗的水量与农业灌溉引用水量关系；农业广义水资源利用率来衡量包括当地降水产生的土壤水在内的农业广义水资源利用效率。

(2) 生态系统广义水资源利用效率核算指标 天然生态系统水资源消耗量都对区域或多或少的产生贡献，为促进广义水资源的高效利用，界定某些与生态系统服务功能密切相关或对经济社会发展具有较高价值的生态用水为生态高效用水，其余的生态耗用水属于低效用水。因此，采用高消耗水率指标来表征区域生态水资源利用效率。

(3) 区域广义水资源利用效率核算指标 区域是一个整体, 区域广义水资源利用效率核算可以避免仅考虑单个区间、单个行业和单个部分的用水效率核算的局限性, 有利于科学认识区域水资源利用潜力, 促进水资源合理开发利用和科学规划布局。区域广义水资源利用效率采用区域高效耗水率、区域人工系统广义水资源利用率和区域广义水资源利用率 3 个指标来表征, 区域高效耗水量反映区域人工系统和自然生态系统的广义水资源消耗中高效利用的比率; 区域人工系统广义水资源利用率和区域广义水资源利用率分别用来表征人工系统以及包括自然生态系统在内的区域广义水资源消耗量与广义水资源利用量的比率。

3.2 广义水资源利用效益核算指标

(1) 经济系统水资源利用效益核算指标 经济系统水资源利用效益核算首先要进行水资源开发利用的工程经济效益评价, 但工程经济效益评价割裂了区域水资源利用的区间、行业和部门间的相互联系, 不能完全反映由某一用水方式变化所引起的区域内部其他行业及区域总经济效益发生的变化。因此, 还需要进行宏观经济效益评价, 以区域整个国民经济总体为主, 分析由用水方式改变所引起的区域整体经济的变化, 包括各部门的经济效益评价和区域生产总值评价两个层次。

(2) 生态系统广义水资源利用效益核算指标 由于生态系统结构和功能的特殊性, 难以对生态系统所产生的效益进行定量的衡量, 尽管有诸多学者从不同方面做了许多尝试, 但是至今尚未形成一个系统完整的标准体系, 对生态系统效益的评价还多处于定性和半定性研究状态。近年来, 常采用生态系统服务价值核算生态系统水资源利用效益, 根据各类生态系统服务功能的识别评估, 综合统计区域各类生态系统的的服务价值, 以此评价生态系统效益。

广义水资源高效利用核算指标体系如表 2 所示。

表 2 广义水资源高效利用核算指标体系

Table 2 Evaluation indexes for generalized water resources efficient utilization

评价层	要素层	指标层	表 达 层
利用效率	人工系统	生活	水资源利用率
		工业	水资源利用率
		农业	高效耗水率
		农业	水资源利用率
		农业	广义水资源利用率
		农业	生态高效水资源消耗量/ 生态广义水资源消耗量
利用效率	生态系统	区域/ 流域	高效耗水率
		区域/ 流域	区域高效水资源消耗量/ 区域广义水资源消耗量
		区域/ 流域	人工系统广义水资源利用率
		区域/ 流域	区域人工系统广义水资源消耗量/ 区域人工系统广义水资源利用量
		区域/ 流域	广义水资源利用率
		区域/ 流域	区域广义水资源消耗量/ 区域广义水资源利用量
利用效益	人工系统	工程经济	内部收益率
		宏观经济	部门 单方耗水工业/ 农业增加值
		部门 区域	单方耗水 GDP
		生态系统	生态系统服务价值

4 案例分析

根据提出的广义水资源高效利用核算指标体系, 本文研究选取宁夏平原区作为研究案例, 核算 2006 年实际情况下区域广义水资源利用效率和效益^[69]。宁夏平原区由黄河冲积平原和贺兰山洪积倾斜平原组成, 总面积为 8339 km², 2006 年宁夏平原区降水量 198 mm, 周边地表地下来水 2.3 亿 m³, 引黄水量为 67.1 亿 m³ (其中城乡工业生活引用 1.7 亿 m³)。

进行人类活动干扰强烈地区的自然-人工复合水循环模拟是核算区域广义水资源利用的基础, 根据宁夏平原区现状水资源条件、土地利用、种植结构、各部门引水实际资料, 运用 WACM (Water Resources Allocation and Cycle Model) 模型分析宁夏平原区实际水资源循环转化情况, 得到现状宁夏平原区人工和自然系统水资源消耗状况, 如表 3 所示。现状宁夏平原区蒸发消耗水量为 49.0 亿 m³, 其中, 人工系统和生态系统分别占 74.6 %和 25.4 %。可见, 宁夏平原区水资源主要消耗于人工系统, 而人工系统中农业耗水占 95.7 %。在宁夏平原区生态系统消耗的水

分中, 湖泊湿地、林地、草地和未利用地蒸发蒸腾消耗水量分别占 18.4 %、9.6 %、28.7 %和 43.3 %。

表 3 2006 年宁夏平原区消耗水量 亿 m³

Table 3 Water consumption quantity of Ningxia Plain in 2006																		
分类	区域		人工系统					生态系统							人工效率		生态效率	
	城镇居地蒸发	城镇工业生活消耗	农田植被截留蒸腾	农田植被蒸腾	农田土壤蒸发	引排渠道	湖泊湿地	林地植被截留	林地植被蒸腾	林地土壤蒸发	草地植被截留	草地植被蒸腾	草地土壤蒸发	未利用地蒸发	高效率	低效率	高效率	低效率
消耗水量	48.96	0.26	1.30	0.71	15.40	17.44	1.39	2.30	0.02	0.28	0.90	0.07	0.95	2.55	5.39	17.67	18.84	3.618.84

现状宁夏平原区水资源利用效率和效益核算结果如表 4 所示。从整个区域来看, 宁夏平原区高效耗水率为 43.5 %, 人工系统广义水资源利用率 46.5 %, 区域广义水资源利用率为 60.6 %。宁夏平原区广义水资源利用效率较低, 尤其是占用水总量比重较大的农业用水效率更为明显, 农业水资源利用率为 37.6 %, 农业广义水资源利用效率也仅为 48.2 %。在现状平原区农业系统消耗水分中, 高效利用率仅为 46.1 %, 不足农业总耗水量的一半。因此, 未来应大力提高农业用水效率。区域生态系统高效耗率仅为 29.0 %, 主要是由于平原区未利用地面积很大, 而林地和草地的覆盖度较低, 林地和草地低效的土壤蒸发量均大于高效的植被蒸腾量, 并且湖泊湿地水面高效耗水量占生态总耗水比例较小。

表 4 宁夏平原区 2006 年广义水资源高效利用核算结果

Table 4 Evaluation result of generalized water resources efficient utilization of Ningxia Plain in 2006				
评价层	要素层		指 标 层	核算结果
利用效率	人工系统	生活	水资源利用率/ %	44.0
		工业	水资源利用率/ %	35.0
		农业	高效耗水率/ %	46.1
			水资源利用率/ %	37.6
			广义水资源利用率/ %	48.2
	生态系统		高效耗水率/ %	29.0
	区域/ 流域		高效耗水率/ %	43.5
			人工系统广义水资源利用率/ %	46.5
		广义水资源利用率/ %	60.6	
利用效益	工程经济		内部收益率/ %	-
	人工系统	部门	单方耗水工业增加值/ (元 m ⁻³)	163.4
	宏观经济		单方耗水农业增加值/ (元 m ⁻³)	1.8
	区域		单方耗水 GDP/ (元 m ⁻³)	12.4
	生态系统		生态系统服务价值/ (亿元 a ⁻¹)	64.5

注: 没有考虑现状某工程的内部收益率, 在分析未来规划情境时, 结合具体规划的水资源开发利用工程, 可以进行工程内部收益率评价。

广义水资源利用效益核算表明, 宁夏平原区生态系统服务价值为 64.5 亿元, 工业和农业单方耗水增加值分别为 163.4 元/m³ 和 1.8 元/m³, 区域单方耗水 GDP 为 12.4 元/m³, 与国内外相比还存在一定的差距, 水资源高效利用的潜力空间还很大, 因此未来需要通过采取一定措施提高用水效率和效益, 以实现用水高效, 确保资源可持续。

5 结 论

广义水资源高效利用核算是以区域自然生态系统和人工系统为对象, 以广义水资源为水源, 在核算指标上包括行业、部门和整个区域的广义水资源利用效率和效益。论文分析了广义水资源高效利用核算的理论内涵, 根据区域/ 流域层次不同土地利用的蒸发蒸腾服务于人工系统和天然系统效率进行了水资源利用的高效和低效界定, 提出广义水资源高效利用核算指标体系, 并且结合宁夏平原区现状情况, 进行系统的区域广义水资源高效利用核算研究。

参考文献:

[1] 裴源生, 赵勇, 陆垂裕, 等. 经济生态系统广义水资源合理配置[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006: 114-139. (PEI Yuan-sheng,

- ZHAO Yong, LU Chui-yu, et al. The generalized rational water resources allocation of economic-ecosystem[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Proess, 2006:114-139. (in Chinese))
- [2] 雷波, 姜文来. 节水农业综合效益评价研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(3):65-69. (LEI Bo, JIANG Wen-lai. The research developing on evaluation of the multi-effect of the water-saving agriculture[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(3):65-69. (in Chinese))
- [3] 来海亮, 汪党献, 吴涤非. 水资源及其开发利用综合评价指标体系[J]. 水科学进展, 2006, 17(1):95-101. (LAI Hai-liang, WANG Dang-xian, WU Di-fei. Comprehensive assessment indicator system for water resources and its development and use[J]. Advances in Water Science[J]. 2006, 17(1):95-101. (in Chinese))
- [4] 陈莹, 刘昌明, 赵勇. 节水及节水型社会的分析和对比评价研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(1):82-87. (CHEN Ying, LIU Chang-ming, ZHAO Yong. Adoption of water conservation practices in the society and comparison evaluation study[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(1):82-87. (in Chinese))
- [5] 王浩, 陈敏建, 秦大庸. 西北地区水资源合理配置与承载能力研究[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2003: 63-69. (WANG Hao, CHEN Min-jian, QIN Da-yong. Study on water resources rational allocation and carrying capacity of Northwest region[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2003:63-69. (in Chinese))
- [6] 赵勇, 张金萍, 裴源生. 宁夏平原区分布式水循环模拟研究[J]. 水利学报, 2007, 38(4):498-505. (ZHAO Yong, ZHANG Jin-ping, PEI Yuan-sheng. Distributed water cycle simulation for plain area in Ningxia autonomous region[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(4):498-505. (in Chinese))
- [7] 赵勇, 陆垂裕, 肖伟华. 广义水资源合理配置研究: 模型[J]. 水利学报, 2007, 38(2):163-170. (ZHAO Yong, LU Chui-yu, XIAO Wei-hua. Study on rational deployment of generalized water resources: Model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(2):163-170. (in Chinese))
- [8] COSTANZA R, ARGE R, GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 386: 253-260.
- [9] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2):189-195. (XIE Gao-di, LU Chun-xia, LENG Yun-fa, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2):189-195. (in Chinese))

Evaluation on efficient utilization of generalized water resources^{*}

PEI Yuan-sheng¹, ZHAO Yong¹, ZHANG Jin-ping^{1,2}, QIN Chang-hai¹

(1. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China;

2. School of Water Conservancy and Environment Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The evaluation of the efficient utilization of the generalized water resources is to assess the water resources at regional/ basin scale. The evaluation based on the simulation of water resources cycle reveals the hydraulic relationship among the regions, industries and sectors, whose water resources are generalized water resources, the evaluation objects are the natural ecosystem and artificial ecosystem, and the evaluation indexes include efficiency and benefit of the generalized water resources in different industries, sectors and regions. The paper divides water consumers into the high efficiency parts and low efficiency ones according to the different evapotranspiration, puts forward the generalized water resources evaluation index which includes the different users, sectors and regions of natural and artificial ecosystem, and takes Ningxia plain as the case study to evaluate the current efficient utilization of the generalized water resources in Ningxia plain.

Key words: generalized water resources; efficiency; benefit; evaluation

^{*} The study is financially supported by the National Basic Research Program of China (No. 2006CB403405) and the National Natural Science Foundation of China (No. 50709043).