

Bian Hua Huan Jing Xia De Shui An Quan

变化环境下的水安全

——中国水利学会水资源专业委员会2007学术年会论文集

中国水利学会水资源专业委员会 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

“十一五”国家重大科技支撑计划南水北调中线水资源调度关键技术研究项目资助

变化环境下的水安全

——中国水利学会水资源专业委员会2007学术年会论文集

中国水利学会水资源专业委员会 编

TV213.4-53
2



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本论文集围绕气候变化下的水环境生态效应；剧烈人类活动下的水循环；变化环境下的水安全指标体系及其变异；变化环境下的水安全风险；变化环境下的水安全调控等议题展开讨论，提出一些应对变化环境下的水安全问题的思路、方法和措施。

本书可供水环境、水资源、环境保护及相关领域人员参阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

变化环境下的水安全：中国水利学会水资源专业委员会 2007 学术年会论文集/中国水利学会水资源专业委员会编. —北京：中国水利水电出版社，2008

ISBN 978 - 7 - 5084 - 5534 - 1

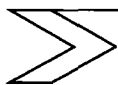
I. 变… II. 中… III. 水资源管理—安全工程—学术会议—文集 IV. TV213.4 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 055635 号

书 名	变化环境下的水安全 ——中国水利学会水资源专业委员会 2007 学术年会论文集
作 者	中国水利学会水资源专业委员会 编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 14.25 印张 338 千字
版 次	2008 年 4 月第 1 版 2008 年 4 月第 1 次印刷
印 数	0001—1500 册
定 价	38.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



序

随着人口的急剧膨胀和工业的迅猛发展,人类正以空前的速度和规模改变着自身赖以生存的地球环境,产生了土地退化、森林减少、海平面上升、臭氧层破坏、生物多样性丧失、极端气候现象等一系列全球环境问题。其中,水资源短缺和水环境恶化更是严重威胁着自然生态系统和人类社会的发展。

联合国政府间气候变化专业委员会的四次评价报告表明,全球气候变化的影响主要表现在四个方面:一是温度变化,二是降水变化,三是海平面变化,四是蒸散发变化。由此可见,上述地球环境的变化都与水资源安全密切相关。因此,进一步深入探究导致全球环境变化的原因,预测其未来趋势和对水资源可能产生的各种后果,并制定相应的对策,已成为世界各国的重要研究课题。在2007年6月发布的《中国应对气候变化国家方案》中,我国政府把水资源列为应对气候变化的重点,并制定了具体的目标和措施。党的十七大报告也指出,要重点加强水、大气、土壤等污染防治,加强应对气候变化能力建设,强化防灾减灾工作等。

为加强国内外对于变化环境下水资源安全的研究,中国水利学会水资源专业委员会于2007年12月7~8日在广东东莞召开了学术年会,围绕以下议题进行了深刻地讨论:

- (1) 气候变化下的水环境生态效应;
- (2) 剧烈人类活动下的水循环;
- (3) 变化环境下的水安全指标体系及其变异;
- (4) 变化环境下的水安全风险;
- (5) 变化环境下的水安全调控。

经过半年时间筹备的学术会议,吸引了国内外100多位专家参加,收录了有价值的学术论文50余篇,30多位国内外知名的学

者在会议上发言。这些举措，对于坚持科学发展观，深入探讨环境变化与水资源之间的关系，寻求水资源应对环境变化的措施，开辟环境变化与水安全创新研究领域，揭示面向水安全的环境变化机理具有十分重要的意义。在此，也非常感谢中山大学水资源与环境研究中心、广东省水利厅、东莞市水利局、广东省东莞市科学技术协会、广东省东莞市水利学会等单位对本次年会的大力支持。

希冀该书的出版能为我国应对变化环境下的水问题提供一些新的思路、方法和措施，对我国经济社会的又快又好发展提供应有的帮助。

中国水利学会水资源专业委员会主任委员



2008年2月

目 录

序

广义水资源高效利用理论与实践研究	1
模拟差分演化混合算法在梯级水库优化调度图制定中的应用	13
宁夏川区节水改造对地下水的影响模拟分析	21
节水措施对水资源宏观效益影响研究	31
汤逊湖水环境及其水体污染源评价研究	39
水资源配置的水循环响应研究——以宁夏为例	49
近 40 年来长江流域水沙变化及可能影响探讨	58
大兴生态水利应对变化环境下的水安全危机 ——对一个“以水兴利、人水共生生态水利模型”的探究	69
大型水电建设下澜沧江干流生态演变及其修复	76
海河流域水资源管理的“红线”	88
基于 Mikebasin 的仁化县数字抗旱预案编制技术	94
辽宁省水环境承载能力分析	101
地下水源保护区划分原理及其应用	105
区域水资源安全量化方法分析	113
洮儿河扇形地水环境变化与对策研究	123
中国岩溶区水资源与环境可持续发展的战略研究	130
漳沱河流域水资源配置研究	135
典型牧区地表水资源量总体分析与评价	142
基于改进基尼系数的水资源可持续利用评价	149
博斯腾湖水盐调控模型研究及其应用	158
黄旗海水质富营养化评价及其年季动态变化特征	166
气候变化对海河流域洪水特性影响	172
变化环境下的丹江大坝下游河道内生态需水量及其时空变异与调控	178
黄土沟壑区不同下垫面土壤水分入渗特性的试验研究	185
西安市降雨特性及雨水资源化模式研究	192
梯级水电站中长期负荷分配研究	197
基于动态搜索法的梯级水库短期优化调度研究	203
广州城市化对地表水质的影响	208
多准则供水安全评价体系研究	215

广义水资源高效利用理论与实践研究^{*}

裴源生 赵 勇 张金萍 秦长海 陆垂裕

(中国水利水电科学研究院 北京 100044)

摘 要:我国水资源短缺与利用效率低下并存,如何科学、合理、高效地利用水资源,促进水资源的可持续利用已经成为实现人与自然和谐相处的关键问题,但目前关于水资源高效利用的概念、内涵、评价指标、核算与调控方法等方面的研究还远不成熟。本文系统开展了广义水资源高效利用理论与实践研究,辨识了广义水资源的服务功能,提出了广义水资源高效利用的概念,从利用水源、利用对象、利用范围和利用指标等方面探讨了广义水资源高效利用的内涵,明确了广义水资源高效利用应遵循的原则、主要特点以及调控因子等,提出了广义水资源高效利用的核算方法与调控框架。论文以宁夏平原区为例,采用开发的 WACM 模型,评价了 2005 年宁夏平原区广义水资源利用效率和效益现状,并构建了水资源高效利用综合方案集,通过多方案的优化调控,提出了经济合理、技术可行、生态良好的宁夏平原区高效利用方案,可为当地水资源高效利用提供指导。

关键词:广义水资源;高效利用;效率;效益;宁夏平原区

水资源是基础的自然资源和重要的战略资源,我国水资源短缺已经成为制约经济社会发展的重要“瓶颈”,而在水资源短缺的同时,水资源利用效率和效益却比较低,2005 年我国万元 GDP 用水量为 304m³,农业灌溉用水有效利用系数为 0.45,万元工业增加值用水量为 169m³,水的重复利用率为 50%,城市供水管网漏损率达 20% 左右等高效利用指标都明显低于世界水平。如何科学、合理、高效的利用水资源,促进水资源的可持续利用已经成为实现人与自然和谐相处的关键问题,但目前关于水资源高效利用的概念、内涵、评价指标、核算与调控方法等方面的研究还远不成熟,本文首先从理论上探讨水资源高效利用概念内涵,然后提出水资源高效利用的核算和调控方法,并结合宁夏平原区进行实例分析。

1 广义水资源高效利用研究现状

国内外在水资源高效利用的基础研究方面取得了一定进展,但目前只是停留在理论探讨阶段,在定量计算和综合调控方面涉及较少,且研究对象局限于小尺度,宏观区域大尺度尚缺乏科学系统的研究,水资源高效利用理论和区域水资源高效利用评价体系及量化计算方法尚未形成,以水循环为基础的缺水地区高效用水机理研究与量化计算仍然是未

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(50709043);国家重点基础研究发展计划(2006CB403405);科技部西部开发重大项目(2004BA901A17)。

来水资源研究领域的重点。

近 20 年来,我国农田水资源高效利用基础研究方面取得了一些重要进展,在农田水分转化规律、水分养分传输动态模拟、作物需水规律与计算模型及抗旱节水机理等方面取得了较大进展。在农业水资源高效利用基础理论方面,从传统的输水过程和田间灌水过程工程节水机理研究发展到生物节水机理研究、植物精量控制用水以及节水系统的科学管理等方面,提出限水灌溉、非充分灌溉与调亏灌溉等概念,提出了高效用水必须减少水分无效损耗的观点。在对水资源利用效率研究方面,目前着重于对微观水分利用效率的研究,尤其是农业用水,国内外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。城市节水方面,目前国内外更多地侧重相关应用研究,包括工业和生活节水与循环利用技术、替代性水源开发利用技术和节水经济政策与定额标准制定等方面。

随着水资源利用研究的不断发展,水资源利用逐渐从微观部门用水提升到宏观区域资源消耗层次上来,如国家“九五”科技攻关项目《宁夏水资源优化配置与可持续利用战略研究》中,针对宁夏灌区的实际情况,提出以区域耗水量的变化作为水资源高效利用的评价指标,采用取用水量的变化作为参考指标。2000 年由世界银行资助的国际合作项目《真实节水量研究》中提出了“真实节水”的概念,认为真实节水是节约产品中所消耗的不可回收水量,消耗水量越少,单位产出越大,则水资源利用越高效。2005 年,在科技部西部开发重大项目《宁夏经济生态系统水资源合理配置》对水资源高效利用研究机理进行了积极探讨,并首次基于区域水资源大系统理论,将土壤水与天然生态纳入到水资源配置体系中,充分考虑人类社会活动对区域水循环转化规律的深刻影响,建立了自然—人工复合式水循环模型,实现了对不同土地利用类型水量垂向和水平的运移与消耗过程的科学再认识,初步提出了灌溉节水与资源节水之间的定量化关系,以及水资源高效利用定量化计算方法,从而为实现区域水资源的高效利用奠定了科学的定量化研究基础。

总体看来,水资源高效利用研究领域还没有科学、清晰的概念,也缺少统一公认的水资源高效利用指标评价体系与核算调控方法。并且由于受传统水资源评价思想的影响,目前水资源高效利用研究集中于对狭义的地表、地下水资源利用效率和效益的评价,无法全面反映有效降水和土壤水的用水效率,水资源调控不完善;由于人类经济社会活动对水的需求占主导作用,水资源高效利用的研究往往集中于人工系统用水,忽略了天然生态系统有效用水需求,水资源效率和效益评价不全面;在用水系统内部,着重于对单个用水行业、用水部门的用水效率和效益研究,缺乏从区域宏观角度研究水资源的循环流动与产出贡献状况,水资源研究不系统;在对用水效率和效益的评价上,仅对灌区用水、企业用水等用水状况进行评价,评价指标层次单一,综合性的宏观区域层次评价系统尚未形成。

2 广义水资源高效利用理论探讨

2.1 广义水资源的界定

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一次性淡水资源,其来源于降水,赋存形式为地表水、土壤水和地下水。从广义水资源界定出发,可以将降水分为三类:第一类是低效降水,是指天然生态系统消耗的,而人工系统无法直

接利用的那部分降水，如消耗于裸地、沙漠戈壁和天然盐碱地的蒸发；第二类是高效降水和土壤水资源，可为天然生态系统与人工生态系统直接利用，对生态环境和人类社会具有直接效用，难于被工程所调控，但可以调整发展模式增加对这部分水分的利用，高效降水包括各种消耗于天然生态系统（包括各类天然林草和天然河湖）和人工生态系统（包括人工林草、农田、鱼塘、水库、城市、工业区和农村等）的降雨；第三类是径流性水资源，包括地表水、地下含水层中的潜水和承压水，这部分水量可通过工程对其进行开发利用。

2.2 广义水资源的服务功能

根据水资源的利用目的，可以将水资源的服务功能分为经济服务功能、社会服务功能和生态服务功能。水的经济服务功能是指维持与生产活动相关的功能，水的生产服务对象主要是指与水有关的经济活动，包括满足农业用水、工业用水、发电、航运及渔业用水等需求，根据水在经济活动中的作用，水的生产服务功能主要包括：作为生产物质产品的原材料；作为生产物质产品的中间产品和最终产品；作为经济活动中的载体或媒介；作为精神享受的物质化产品。水的社会服务功能主要是指人类的生活用水和为提高人类生活质量的用水。水的生态系统服务功能是指水维持自然生态过程与区域生态环境条件的功能，包括泥沙的推移、营养物质的运输、环境净化及维持湿地、湖泊、河流等自然生态系统的结构与过程及其他人工生态系统的功能。

2.3 广义水资源高效利用概念的内涵

水具有一切资源特性，水资源的使用能对经济社会的发展起到积极有效的作用，能够对生态与环境起到支撑和维持作用，因此水资源高效利用研究必须围绕水的利用过程进行，在水资源利用过程中体现了水的资源消耗特性；其次，水资源利用消耗的高效性包括两重相互联系的特征，微观资源利用的高效率和中观资源配置的高效益；第三，水资源之所以要进行高效利用，其目的就是为了充分发挥水作为资源所具有的潜在的为人类社会和生态系统服务的价值和功能，以最少的资源消耗获得最大的综合效益，从而实现区域水资源的可持续利用，促进区域的可持续发展。因此，水资源高效利用概念是指在相同耗水情况下，保持生态系统良好，且经济社会效益最佳的水资源利用方式，或者是在达到区域经济社会发展目标和生态环境建设目标的基础上，区域耗水量最少的水资源利用方式。

广义水资源高效利用的“广义”应包括以下四个方面的含义：一是利用水源是广义的，不仅包括传统的狭义性地表、地下水资源，还包括土壤水和降水在内的广义水资源；二是利用对象是广义的，不仅包括社会经济发展用水，而且还包括天然生态用水；三是利用范围是广义的，不仅针对单个用水部门和用水单元的水资源利用过程研究，而且还从宏观区域整体出发，研究整个区域的水资源利用状况；四是利用指标是广义的，不仅可以采用单项指标评价单个行业的用水效率和效益，而且可以采用综合评价指标评价区域用水效用。

2.4 广义水资源高效利用原则

广义水资源高效利用应遵循有效性、公平性和可持续性原则。广义水资源高效利用首先应遵循有效性，必须获得水资源利用的经济、社会、生态和环境产出效益，因此在对水资源的分配和使用过程中，注重提高水的产出效益，通过改变水资源开发利用方式和行为追求水资源利用高效益。公平是历史的范畴，具有历史的继承性和内涵上的延续性，主要体现在社会阶层之间、地区之间和部门之间的公平。阶层之间公平是体现水资源的公益

性，保障人人享有水资源的权利；地区之间的公平是要保障流域上下游、左右岸等不同区域之间水资源利用的权利；部门之间的公平是人类生活、工业与农业生产、自然生态系统等不同部门之间以及各自部门内部水资源利用的公平性。可持续性主要体现在保证水资源的可持续利用，要使后代人拥有同样的发展机会，保证水资源的再生能力，实现经济长期稳定的持续增长，以及经济社会和生态系统的健康，最终形成一个资源、经济、社会、生态相互协调的和谐社会。

2.5 广义水资源利用效率与效益

除了航运、发电等非消耗性水资源利用之外，对水资源的使用是通过水资源的消耗来实现，正是这种无法回收、无法再重复利用的资源消耗体现了水资源的根本特性。水资源在其利用消耗过程中表现为两种途径，一是被生命体消耗或产品带走，二是表现为通过蒸散发的形式参与到经济和生态量的产出过程中。因此，广义水资源利用效率是以资源消耗为表征的水的资源消耗量与取用水量的比值，反映的是水在供人类社会和自然生态生存、生产中的资源型消耗比率。广义水资源利用效益是指经济社会系统和自然生态系统在水资源的利用过程中产生的经济、社会与生态效益，采用水的资源消耗量与相应的经济与生态产出量比值来反映。

2.6 广义水资源高效利用主要调控因子

水资源高效利用是从区域宏观高度研究水资源在经济、生态系统中的服务转化机理，研究对象涵盖区域所有用水部门和用水单元，由于水的循环流动性，单个用水部门的水资源利用方式发生变化不仅会对本用水单元用水过程和用水效益产生影响，还会对区域整个用水系统产生连带反应。因此，影响水资源高效利用的因素很多，如由于采取节水新工艺、新技术等技术改造措施而引起的工业万元增加值用水量变化，渠道衬砌（包括干支渠、斗农渠）、供水水价调整、种植结构调整、土地平整等农业水资源高效利用措施，以及区域林、草、湖泊湿地等生态格局的变化等都将对区域水资源利用产生影响等，在进行不同措施导致水资源利用效率和效益变化的分项及综合评价研究中，需要抓住主要矛盾，研究对区域水资源利用效率和效益影响较大的因素，对其进行重点分析，评价不同水资源开发利用情景下的经济与生态效应反馈机制，提出适宜的区域水资源高效利用模式。

2.7 广义水资源高效利用特点

根据前面对水资源高效利用概念、内涵的分析，广义水资源高效利用研究具有如下特点：

（1）以广义水资源的可持续利用为目标，减少用水过程中的资源损耗，提高单方耗水的有效产出，并能在社会、经济、生态和环境目标之间进行平衡，实现资源、环境和经济社会的协调发展。

（2）以区域广义水资源利用为研究对象，打破传统研究只局限于某个用水部门或行业的水资源利用方式，站在宏观区域整体的角度提出水资源的高效利用理论、方法、评价和调控等过程。

（3）以水的资源特性为出发点，研究资源的高效利用，拓展以往仅针对取用水过程，研究自然—人工复合作用下区域水循环变化规律，以及广义水资源在经济系统和生态系统中的循环过程，实现对区域水资源的利用消耗机理的科学认知。

(4) 以广义水资源合理配置为手段, 研究对象不仅包括传统的地表、地下水资源, 而且需要将降水和土壤水纳入进行统一考虑, 用水对象不仅包括工业、农业、生活, 而且还包括人工生态和天然生态, 需要充分利用降水、合理利用地表及地下水、科学调控土壤水。

(5) 以自然—人工水循环模拟为基础, 在对区域水循环正确认知的基础上, 分析自然—人工共同作用下的区域水循环转换关系, 研究各种水资源开发利用方式对水循环的影响和水资源供用耗排变化规律等, 进而才能进行高效利用和调控, 实现水资源的高效利用。

(6) 以宏观经济效益分析为依据, 各种水资源开发利用方式和行为都是为了获取经济、社会和生态与环境利益, 水资源高效利用的经济效益分析要求从全局出发, 研究水的宏观资源消耗产生的经济效益。

(7) 以促进生态与环境稳定为前提, 水资源高效利用不仅注重对经济利益的获取, 还要保证必需的生态系统服务功能, 尤其是对于干旱半干旱地区, 水资源高效利用不仅要满足生态用水, 还需要从水分对生态的驱动机制出发, 保证区域生态系统处于良好状态。

3 广义水资源高效利用核算与调控框架

广义水资源利用涉及多个用水部门, 单一部门的用水结构和水平发生变化, 势必会对其他行业用水产生联系, 因此区域水资源利用必须遵循有效性、公平性和可持续性原则, 还应考虑各方利益相关者以及各节水措施的技术可行性等其他约束条件, 综合权衡区域经济系统和生态系统之间的相互作用, 结合专家经验, 进行多方案的设置分析, 构建广义水资源高效利用方案集, 对方案集中每个方案进行水资源配置分析和水循环过程模拟, 研究每个方案的经济、社会和生态后效响应状况, 进行研究区域广义水资源利用效率和效益评价, 进行方案集的优化选择, 推荐经济合理、技术可行、生态保障的水资源高效利用方案, 如图 1 所示。

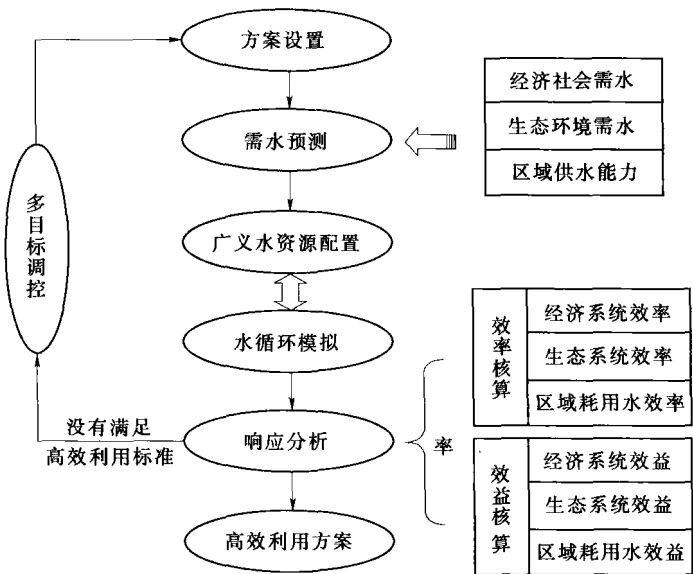


图 1 广义水资源高效利用研究框架

需水预测是针对不同组合方案，根据水资源条件及经济社会发展水平，结合各节水措施的应用，对未来经济社会及生态需水进行预测；根据水源工程新增挖潜等措施，预测其可能达到的供水能力，为水资源开发利用方式下的区域水资源合理配置提供定量依据。

广义水资源合理配置是在自然系统和人工系统之间合理配置包括土壤水在内的广义水资源，采用广义水资源合理配置模型（WACM）对不同配置方案的区域广义水资源供需平衡状况进行分析，模拟不同配置方案下的区域水循环状况，研究不同用水部门及土地利用类型的广义水资源供用耗排关系以及地下水位变化等，分析水资源在经济系统和生态系统的消耗和运移状况。

广义水资源合理配置的响应分析是定量核算水资源高效利用的关键，首先要构建广义水资源利用评价指标体系，根据广义水资源合理配置模型分析不同用水单元及区域水资源消耗量和实际配水状况，分析用水效率变化；采用工程经济效益分析和宏观区域投入产出模型、生态系统服务价值计算方法，分析区域不同层次、不同行业用水经济效益和生态效益；对不同方案下的水资源利用效率和效益进行综合比选，研究不同水资源利用方式对区域水资源高效利用的定量影响，根据定量核算的水资源高效利用评定结果，结合区域水资源开发利用实际情况，基于由专家决策，判定方案合理性，若合理性较差，则对方案重新进行多目标调控，反复计算，直至最终得出各方都比较满意的合理方案，作为最终选定的水资源高效利用方案。

广义水资源高效利用核算评价指标体系包括效率评价和效益评价两个方面，如表 1 所示。效率评价层进一步划分为社会经济水资源利用效率、生态水资源利用效率和区域水资源利用效率。由于用水行为、用水结构、用水方式、用水水平以及受重视程度的不同，生活用水、工业用水和农业水资源利用效率存在着很大差异，因此社会经济系统和区域广义水资源利用效率评价指标和方法也不同，而生态系统用水效率采用高效耗水率来表征生态水资源利用效率。效益评价分别采用工程内部收益率、单方耗水增加值、生态系统服务价值和单方耗水 GDP 指标来表征水资源的利用效益。

表 1 水资源高效利用核算指标体系

评价层	要素层		指标层	表达层
效率	社会经济系统	生活	水资源利用率	总耗水/总用水量
		工业	水资源利用率	总耗水/总用水量
		农业	高效耗水率	农业高效耗水量/农业总耗水量
			水资源利用率	农业蒸发蒸腾消耗水量/总用水量（不包含降水）
			广义水资源利用率	农业蒸发蒸腾消耗水量/广义水资源量（包括降水）
	生态系统		高效耗水率	生态高效耗水量/生态总耗水量
	区域		高效耗水率	区域高效耗水量/区域总耗水量
			经济系统广义水资源利用率	区域经济系统总耗水量/经济系统水资源利用量
		区域广义水资源利用率	区域总耗水量/区域广义水资源利用量（包括降水）	
效益	社会经济系统	工程	内部收益率	
		宏观	单方耗水工业增加值	工业增加值/工业总耗水
			单方耗水农业增加值	农业增加值/农业总耗水
	生态系统		生态系统服务价值	
	区域		单方耗水 GDP	GDP/总耗水

可以看出，水资源高效利用的核算与调控是通过在经济系统和生态系统间进行水资源的合理配置，模拟不同水资源开发利用情景下的区域水循环转换过程和水资源演变规律，分析相应状况下的部门及区域用水效率和效益，寻求资源、经济和生态和谐发展的水资源利用模式。

4 实例研究

根据提出的广义水资源高效利用理论和构建的广义水资源高效利用核算与调控模型，本文研究选取宁夏平原区作为研究案例，开展广义水资源高效利用核算与调控实例研究。宁夏平原区包括银川平原和卫宁平原，行政区涉及银川市、吴忠市、石嘴山市和中卫市等 4 个地级市，自秦汉时期就开始了引黄灌溉，素有“天下黄河富宁夏”之称，平原区总面积为 8339km²。本文首先进行现状 2005 年宁夏平原区水资源利用效率和效益分析，以此为基础，核算区域引水干支渠衬砌产生的广义水资源利用效率和效益变化，然后简单说明综合方案的优化调控寻求区域水资源高效利用方案。

4.1 现状水资源利用效率分析

现状宁夏平原区水资源利用效率评价结果如表 2 所示。整体来看，宁夏平原区用水效率较低，尤其是占用水总量比重较大的农业用水效率更为低下，现状农业水资源利用率仅为 37.6%，广义水资源利用效率为 46.2%。在现状平原区农业系统消耗水分中，高效利用的比率为 48.0%，可以看出，尽管农业耗水占据非常大的比重，但其高效水量消耗却不足农业总耗水量的 1/2，因此，未来应该具有很大的潜力加大农业节水力度，提高农业高效比例。平原区生态系统高效消耗水分的比率很低，仅为 29.0%，主要是由于平原区未利用的地面面积很大，而林地和草地的覆盖度较低，林地和草地土壤蒸发均大于植被蒸腾，林地和草地的高效耗水低于低效耗水，且湖泊湿地水面消耗所占比例也较小，因此，未来应适当控制平原区地下水位，限制低效蒸发消耗水量，提高林草覆盖度，实行湖泊湿地补水计划是提高水资源利用效率和改善当前宁夏生态环境状况的主要方向。从整个区域层次上看，区域高效耗水率为 43.7%，经济系统广义水资源利用率 46.5%，广义水资源利用率为 57.0%。

表 2 现状年水资源利用效率与效益状况

评价层	要素层	指 标 层	数 值
效率	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（%）	48.0
		水资源利用率（%）	37.6
		广义水资源利用率（%）	46.2
	生态	高效耗水率（%）	29.0
	区域	高效耗水率（%）	43.7
		经济系统广义水资源利用率（%）	46.5
		广义水资源利用率（%）	57.0

续表

评价层	要素层	指 标 层	数 值
效益	工业	单方耗水工业增加值（元/m ³ ）	163.42
	农业	单方耗水农业增加值（元/m ³ ）	1.83
	生态系统	生态系统服务价值（亿元）	64.50
	区域经济效益	单方耗水 GDP（元/m ³ ）	12.41

表 2 为现状宁夏平原区水资源利用效益分析结果，在用水经济效益中，宁夏平原区工业和农业单方耗水增加值分别为 163.42 元/m³ 和 1.83 元/m³，区域单方耗水 GDP 为 12.41 元/m³，单方耗水经济效益仍有待于进一步提高。宁夏用水结构和用水效率与国内外相比，还存在一定的差距，水资源高效利用的潜力空间还很大，未来有必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，确保资源可持续发展。

4.2 渠系衬砌对区域水资源高效利用的影响

工业节水改造、渠系衬砌、种植结构调整、水价改革、生态格局变化等措施都将对水资源高效利用产生影响，渠道衬砌是宁夏平原区大型灌区节水改造最主要的工程措施。因此，本次仅选择代表性的渠系衬砌措施实施对宁夏平原区水资源利用效率和效益的影响，方案研究在其他因素维持不变的情况下，仅考虑平原灌区干支渠衬砌率的改变，且将衬砌节约水量向工业转移。现状宁夏平原区干支渠衬砌率约为 20%，本次研究分别选取干支渠衬砌率为 20%、30%、40%、50%和 60%情况下的区域水资源高效利用进行情景对比分析研究，分析不同干支渠衬砌对区域水资源高效利用的影响。采用广义水资源高效利用核算和调控模型，可以得到不同衬砌方案的区域水资源和水循环转化规律，不同层次水资源利用效率和效益，如表 3 所示。模拟发现衬砌率的提高将使灌溉引水量减少，水循环转化通量减少，转化强度减弱，区域内各用水户输送、消耗、运移和排泄水量发生变化，水资源利用效率和效益也呈现出显著的变化。

表 3 不同衬砌方案的水资源高效利用变化

评价层	要素层		指 标 层	衬砌率 30%	衬砌率 40%	衬砌率 50%	衬砌率 60%
效率	社会 经济 系统	生活	水资源利用率（%）	44.0	44.0	44.0	44.0
		工业	水资源利用率（%）	45.0	45.0	45.0	45.0
		农业	高效耗水率（%）	47.7	47.6	47.5	47.5
			水资源利用率（%）	42.5	43.7	44.4	44.9
			广义水资源利用率（%）	49.4	50.7	51.5	52.1
	生态系统		高效耗水率（%）	28.8	28.7	28.7	28.6
	区域	高效耗水率（%）		45.0	44.9	44.9	44.9
		经济系统广义水资源利用率（%）		50.3	51.5	52.2	52.8
		区域广义水资源利用率（%）		60.5	61.7	62.4	63.0

续表

评价层	要素层		指 标 层	衬砌率 30%	衬砌率 40%	衬砌率 50%	衬砌率 60%
效益	社会经济系统	工程	内部收益率（%）	14.53	13.08	12.16	11.92
		宏观	单方耗水工业增加值（元/m³）	186.22	186.22	186.22	186.22
			单方耗水农业增加值（元/m³）	2.37	2.42	2.46	2.50
	生态系统		生态系统服务价值（亿元）	64.08	63.72	63.52	63.26
	区域		单方耗水 GDP（元/m³）	22.11	22.32	22.51	22.69

不同衬砌率下区域用水效率和效益的关系如图 2 所示。可见，仅考虑干支渠衬砌，区域用水效率和效益有同步增减趋势，随着用水效率的提高，区域用水效益也逐渐增加。

4.3 宁夏平原区水资源高效利用综合方案分析与优化调控

工业节水改造、渠系衬砌、种植结构调整、水价改革、生态格局变化等不同水资源高效利用措施都将对区域水资源高效利用产生影响，其基本假定是其他因素都不发生变化，仅仅考虑单因素改变对平原区水资源利用效率和效益的影响，而在实践生产中，这种假定是不可能存在的。因此，在单项因素水资源利用效用分析的基础上，将综合前面单项因素，结合宁夏平原区现状和规划情况，通过专家决策分析，构成水资源高效利用方案集，进行方案集的水资源利用效用分析，如表 4 所示。

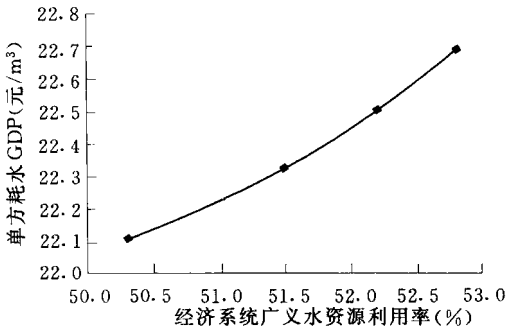


图 2 不同衬砌率方案的用水效率和效益相关关系

表 4 水资源高效利用方案集

措施 方案	万元工业增加值用水定额 (m ³ /万元)	干支渠衬砌率 (%)	斗农渠衬砌率 (%)	水稻种植面积 (万亩)	套种种植面积 (万亩)	农业供水水价 (元/m ³)	高精度土地平整较现状提高程度 (%)
1	139	25	20	80	80	0.035	30
2	139	30	10	80	80	0.040	30
3	139	30	15	90	100	0.030	30
4	139	30	20	80	80	0.040	50
5	139	35	15	90	100	0.035	30
6	139	35	20	80	80	0.035	50
7	139	40	10	80	80	0.030	30
8	139	40	15	90	100	0.040	30
9	139	40	20	80	80	0.030	50

运用广义水资源高效利用核算与调控模型对综合方案下的水资源利用效率和效益进行多方案对比分析，宁夏平原区综合方案的水资源利用效率和效益变化如表 5 所示。

广义水资源高效利用是在保持区域生态系统健康良好和社会经济稳定发展的前提下，寻求微观经济合理、宏观经济最高的方案。宁夏由于地理位置的特殊性，区域耗水受到严格限制，水资源高效利用的标准为在保证生态系统良好的基础上，以有限的水资源消耗获得最大的宏观区域经济效益，即区域单方耗水 GDP 最大。通过不同综合水资源利用方式下区域的用水效率和效益进行分析权衡，尽管方案 9 单方耗水 GDP 最大，但是由于其属于高强度节水方案，天然生态面积减少，生态系统服务价值很低，整个生态处于不良状态。

表 5 综合方案的水资源利用效率和效益变化

评价层	要素层		指 标 层	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7	方案 8	方案 9
效率	社会 经济系统	生活	水资源利用率（%）	44.0	44.0	44.0	44.0	44.0	44.0	44.0	44.0	44.0
		工业	水资源利用率（%）	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
		农业	高效耗水率（%）	44.7	44.7	46.9	44.6	46.9	44.4	44.4	46.7	44.2
			水资源利用率（%）	46.5	46.2	45.1	47.3	45.6	48.1	46.9	46.2	49.1
			广义水资源利用率（%）	52.6	52.3	51.6	53.5	52.2	54.4	53.0	52.8	55.3
	生态系统		高效耗水率（%）	28.6	28.6	28.5	28.3	28.4	28.2	28.5	28.4	28.2
	区域	高效耗水率（%）	43.0	43.0	44.4	42.9	44.4	42.8	42.8	44.3	42.7	
		经济系统广义水资源利用率（%）	53.3	53.0	52.4	54.1	52.9	54.9	53.7	53.4	55.6	
		区域广义水资源利用率（%）	63.6	63.3	62.6	64.3	63.1	65.1	63.9	63.5	65.8	
效益	社会 经济系统	工程	内部收益率（%）	13.28	12.75	12.18	13.81	12.14	13.36	12.30	12.02	12.99
		宏观	单方耗水工业增加值（元/m³）	174.42	174.42	174.42	174.42	174.42	174.42	174.42	174.42	174.42
			单方耗水农业增加值（元/m³）	2.52	2.53	2.45	2.63	2.52	2.70	2.66	2.57	2.76
	生态系统		生态系统服务价值（亿元）	63.48	63.58	63.99	63.16	63.85	63.04	63.40	63.72	62.84
	区域		单方耗水 GDP（元/m³）	22.83	22.81	22.29	23.19	22.48	23.40	23.13	22.63	23.55

对高效利用方案的选择不可避免的涉及诸多利益相关者，各利益相关者根据自己的偏好，以及兼顾技术能力、群众意愿、工程条件等其他因素进行方案选择，本文采用加权选择法进行利益相关者决策，8 个候选方案的评价指标及指标值如表 6 所示。

表 6 广义水资源高效利用方案评价指标

方案	内部收 益率 （%）	单方耗水 GDP （元/m ³ ）	农业水资 源利用率 （%）	区域广义水 资源利用率 （%）	农业灌 溉水价 （元/m ³ ）	耗水 节水量 （亿 m ³ ）	区域生态 服务价值 （亿元）	地下水位相对 现状下降幅度 （cm）
1	13.28	22.83	46.5	70.2	0.035	2.74	63.48	31.35
2	12.75	22.81	46.2	69.9	0.04	2.58	63.58	27.59
3	12.18	22.29	45.1	68.9	0.03	1.77	63.99	23.85

续表

方案	内部收益率 (%)	单方耗水 GDP (元/m ³)	农业水资源利用率 (%)	区域广义水资源利用率 (%)	农业灌溉水价 (元/m ³)	耗水节水量 (亿 m ³)	区域生态服务价值 (亿元)	地下水位相对现状下降幅度 (cm)
4	13.81	23.19	47.3	71.2	0.03	3.31	63.16	45.10
5	12.14	22.48	45.6	69.5	0.035	2.03	63.85	33.19
6	13.36	23.4	48.1	72.2	0.035	3.58	63.04	52.84
7	12.30	23.13	46.9	70.7	0.03	3.05	63.40	37.31
8	12.02	22.63	46.2	70.1	0.035	2.32	63.72	40.61

根据评分函数构造方法及利益相关者意愿要求,得到各评价指标值的构造评分函数值,在评估目标权重时,根据宁夏具体情况,选择若干位不同领域的利益相关者作为决策人员,包括中央政府官员、地方官员、灌区管理人员、农民、生态学专家、水资源学专家、农业灌溉专家等,各评判人员根据自己的知识、经验和偏好对水资源高效利用候选方案进行全面了解、认识和综合评定,对每个方案的目标权重进行反复分析评估,具体方法可根据 Delphi 专家调查法进行,得到各目标的权重值,确定各方案的决策选择函数值。如表 7 所示,方案 6 的决策选择函数值最大,表明各决策者的综合决策意见倾向于方案 6,因此方案 6 为宁夏平原区水资源高效利用的首选方案,次之为方案 4。

表 7 各方案的决策选择函数值

综合方案	1	2	3	4	5	6	7	8
选择函数值	53.6	44.48	34.73	68.84	33.48	68.96	58.72	37.14

5 小结

水资源短缺与利用效率低下促使人们认识到提高有限资源的利用效率和效益是解决水资源困境的有效手段,我国生产管理和科学研究中也逐步重视水资源高效利用研究,但还没有开展广义水资源高效利用相关工作研究,本文开展的广义水资源高效利用理论与实践研究仅是起步探索,目的是起到抛砖引玉的作用,广义水资源高效利用的概念、内涵、评价指标、评价方法、核算技术与调控手段等内容还需要不断完善充实。

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.

[2] 裴源生,张金萍. 水资源高效利用概念和研究方法探讨 [G] //中国水利学会水资源专业委员会. 中国水利学会 2005 学术年会论文集. 北京:中国水利水电出版社, 2005: 27 - 31.

[3] 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 (3): 163 - 170.

[4] 沈振荣,汪林,于福亮等. 节水新概念——真实节水的研究与应用 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006: 1 - 10.