

基于蒸散的水资源 利用效率与效益评价

Evaluation of Water Use Efficiency and
Benefit Based on Evapotranspiration

黄耀欢 江 东 王建华 著



气象出版社
China Meteorological Press

本书由地震行业科研专项经费项目

“中国地震应急救援的区域差异性分析”(201208018)资助

基于蒸散的水资源利用 效率与效益评价

黄耀欢 江 东 王建华 著

内容简介

本书在综述国内外有关水资源利用效率与效益研究现状和进展的基础上,提出了基于蒸散的水资源利用效率与效益评价方法体系;阐述了蒸散、植被指数等主要自然要素指标的反演技术;构建了支持水资源利用效益评价的社会经济要素空间化模型;并对相关理论、方法、模型和技术在徒骇马颊河流域水资源管理的实例应用进行了介绍。

本书可供水文学、遥感应用等相关专业科研人员、大专院校师生和水资源管理行业的业务人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于蒸散的水资源利用效率与效益评价/黄耀欢,江东,
王建华著. —北京:气象出版社,2012.9

ISBN 978-7-5029-5574-8

I. ①基… II. ①黄…②江…③王… III. ①水蒸发-
水资源利用-研究 IV. ①TV213.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 226845 号

Jiyu Zhengsan de Shuiziyuan Liyong Xiaolü yu Xiaoyi Pingjia

基于蒸散的水资源利用效率与效益评价

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址: <http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:简学东

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京京华虎彩印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:170 千字

版 次:2012 年 10 月第 1 版

定 价:25.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcs@cma.gov.cn

终 审:章澄昌

责任技编:吴庭芳

印 张:6.75

印 次:2012 年 10 月第 1 次印刷

前言

随着全球气候变化和人类活动影响的加剧,水资源短缺已演变成世界备受关注的资源环境问题之一,成为影响自然生态环境和社会经济发展的一个复杂且突出的“瓶颈”。我国由于人口众多,水资源量少,同时水资源开发潜力越来越小,因此,在现有水资源开发利用程度下提高水资源利用效率是现阶段解决水资源短缺的一个重要方向。水资源利用效率与效益评价是水资源管理与水资源合理配置的一项基础性工作,是实现提高水资源利用效率与效益的前提,但由于水循环系统本身是地表过程的一个复杂系统,因此,水资源利用效率与效益的评价需要全面考虑水源、水循环所有环节及流域子系统内部联系等,同时在水资源利用效益评价中还需要综合采取自然科学、现代技术及经济社会等多方面的手段和方法,多管齐下,综合考虑,才能为水资源利用状况的客观评价及各项水利措施的制定和工作开展提供准确可靠的数据支持。事实上,国家也把水资源利用效率与效益问题提到了一个重要的战略高度,2011年初的中央一号文件《中共中央国务院关于加快水利改革发展的决定》首次对水利工作进行了全面部署,该文件中就将水资源利用效率作为解决我国现阶段水资源短缺的核心问题。

从国家战略需求上看,水资源问题已经成为国民经济快速发展、国家宏观经济决策及国家重大开发举措实施的严重制约,水资源利用效率评价是其中关键的基础性工作之一。目前的水资源利用效率评价由于理论和方法本身局限性,使得现有的方法难以客观反映流域尺度水资源利用效率的状况,只有通过深刻明晰水循环过程及水资源利用消耗本质,构建基于耗水过程的水资源利用效率和效益评价方法及其指标,才能实现流域尺度的广义水资源利用效率的客观评价。鉴于传统监测及模拟数据时空分辨率低的缺点,将遥感及GIS等空间技术引入到水资源利用效率和效益评价过程中,对评价指标中的参数进行估算,能够从空间上保证获得统一的评价结果,从而指导流域水资源利用调控方法的实行并对调控的时空效应进行定量评价,确保水资源合理利用以支撑地区经济社会发展和生态环境稳定。

本书凝练了作者在参与地震行业科研专项经费项目(《中国地震应急救援的区域差异性分析》)、国家重点基础研究发展计划(973)课题(《基于水循环的水资源利用效用评价基础理论与方法》)等项目的系列研究成果,在国内外水资源利用效率与效益评价的理论方法基础上,结合我国水资源利用监测评价的应用需求,提出了水资源利用效率与效益评价的理论框架和评价指标体系;系统阐述了基于包括遥感技术、GIS等“3S”技术在区域水资源利用效率与效益评价应用过程中的遥感数据处理技术、参数定量反演技术、遥感综合评价技术、社会经济数据GIS空间分析技术;并将该技术体系在徒骇马颊河流域水资源利用效率与效益评价应用情况进行了介绍。

本书共分6章,第1章对本书形成背景进行了介绍,并阐述了有关ET遥感反演和水资源利用效率与效益评价的国内外研究现状,分析了当今进行水资源利用效率和效益评价存在的问题;第2章介绍了区域水资源利用效率与效益评价的方法和指标体系,分别从农业系统、生

态环境系统及区域三个方面对各自的指标进行了定义和阐述;第3章详细叙述了主要耗水参数 ET 的遥感反演算法,包括 MOD16 算法进行 ET 反演的技术流程和关键技术,并对其其中的一些重要的参数如植被指数、地表净辐射等的估算反演进行了表述;第4章重点介绍了社会经济要素空间化的流程和结果,包括社会经济要素空间化的构建原理和结合土地利用数据构建的 GDP 空间化模型;第5章全面应用构建的指标和反演数据集对徒骇马颊河流域水资源利用效率与效益评价的结果,通过对 2000 年和 2005 年的流域水资源利用效率和效益的计算和对比,提供农业系统、生态环境系统和流域水资源利用效率和效益变化情况,并在此基础上分析了可能造成该变化的原因;第6章对全书得主要内容进行了总结。

需要特别指出的是,形成本书的基础研究和主要成果与作者在中国水利水电科学研究院水资源所的学习和研究经历是密不可分的,在这里要对导师王浩院士的指导及中国水利水电科学研究院水资源所的老师同学的帮助表示感谢和由衷敬意,谨以此书作为这段充满艰辛而又硕果累累的岁月的见证和总结。同时对付晶莹和秦瑞同志在本书的整理工作所付出的努力表示由衷的感谢。

水资源利用效率与效益评价是一个重要而充满挑战的研究方向,但受问题复杂性、时间和作者水平的限制,书中所描述的难免会有许多片面、遗漏甚至于错误的地方,希望能在批评、讨论和争鸣的气氛下不断改进。

黄耀欢

2012 年 3 月于北京

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 水资源利用效率与效益研究的必要性	(1)
1.1.1 水资源利用效率与效益评价的必要性	(1)
1.1.2 水资源利用效率与效益的内涵	(2)
1.2 水资源利用效率与效益研究现状及趋势	(3)
1.2.1 水资源利用效率研究现状及趋势	(3)
1.2.2 水资源利用效益研究现状及趋势	(8)
1.2.3 蒸散(ET)遥感反演的研究现状及趋势	(11)
1.3 水资源利用效率与效益评价技术路线	(16)
第 2 章 水资源利用效率与效益评价方法	(18)
2.1 影响水资源利用效率和效益的主要因素	(18)
2.2 基于耗水过程的水资源利用效率评价	(19)
2.2.1 水资源利用效率	(19)
2.2.2 水资源利用效率界定	(20)
2.2.3 水资源利用效率评价指标	(22)
2.3 水资源利用效益评价方法	(25)
2.3.1 基于耗水过程水资源利用效益评价	(25)
2.3.2 水资源利用效益评价指标	(27)
第 3 章 水资源利用效率/效益评价自然要素指标遥感获取	(30)
3.1 植被指数	(30)
3.1.1 EVI 数据说明及其预处理	(30)
3.1.2 EVI 处理算法及其实现	(31)
3.1.3 EVI 重构结果	(33)
3.2 地表净辐射	(35)
3.2.1 基于 MODIS 的地表水汽压反演	(35)
3.2.2 长波辐射反演	(40)
3.2.3 净辐射反演	(42)

3.3	蒸散(ET)	(42)
3.3.1	VI-Ts 特征空间	(43)
3.3.2	ET 反演的 MOD16 算法介绍	(45)
3.4	我国地表干旱程度分区	(48)
3.4.1	分区处理流程	(49)
3.4.2	分区结果	(52)
第 4 章	水资源利用效率/效益评价社会经济要素空间模拟	(54)
4.1	空间分布模型构建原理	(54)
4.1.1	社会经济要素空间化的基本内涵	(54)
4.1.2	社会经济要素空间化分布模型的构建原理	(55)
4.2	社会经济要素空间分布模型	(56)
4.2.1	GDP 的空间分布	(57)
4.2.2	GDP 空间分布模型的构建	(57)
第 5 章	水资源利用效率与效益评价实例研究	(63)
5.1	研究区概况	(63)
5.1.1	流域水资源量与开发利用现状	(64)
5.1.2	流域水资源利用存在的问题	(65)
5.2	数据获取	(65)
5.2.1	土地利用数据	(65)
5.2.2	经济数据	(66)
5.2.3	蒸散数据	(67)
5.3	流域水资源利用效率评价	(70)
5.3.1	农业用水效率	(75)
5.3.2	生态系统水资源利用效率	(77)
5.3.3	区域水资源利用效率	(81)
5.4	流域水资源利用效益评价	(82)
5.4.1	农业水资源利用效益	(83)
5.4.2	生态水资源利用效益	(84)
5.4.3	区域水资源综合利用效益分析	(88)
第 6 章	结 论	(91)
	参考文献	(92)
	彩 插	

第1章 绪论

“水者何也？万物之本原也，诸生之宗室也。”“是故具者何也？水是也，万物莫不生，唯知其托者能为之天正。具者，水是也。”“集於诸生，故曰水神。集於草木，根得其度，华得其数，实得其量，鸟兽得之，形体肥大，羽毛丰茂，文理明著，万物莫不尽其几，反其常者，水之内度适也。”

——《管子·水地》

1.1 水资源利用效率与效益研究的必要性

1.1.1 水资源利用效率与效益评价的必要性

水是人类生存和发展的重要资源，是生命之源、文明之源，更是活力之源、发展之源。随着水资源危机的加剧和水环境质量不断恶化，水资源短缺已演变成世界备受关注的资源环境问题之一。我国是一个水资源短缺、水旱灾害频繁的国家，如果按水资源总量考虑，水资源总量为 2.81 万亿 m^3 ，其中河川径流量约占 94%，约占全球径流总量的 5.8%，居世界第 6 位。但是，我国人口众多，若按人均水资源量计算，每年人均河川径流量为 2085 m^3 ，不足世界人均水量的 1/4，在世界排第 110 位（按 149 个国家统计，统一采用联合国 1990 年人口统计结果），已经被联合国列为 13 个贫水国家之一（Feng *et al.*, 2000）。

此外，全球气候变化和水质恶化使得水资源状况更加紧迫。研究表明，近 50 年来由于气候变化，我国多数江河实测径流呈现减少趋势，特别是 20 世纪 80 年代以来，北方河流径流量减少明显，如海河流域各站减少 40% 以上，黄河流域中下游各站减少 30% 以上（张建云等，2007）。同时，由于人类活动影响的加剧，水质问题和地下水的开采引起水生态环境恶化、海水倒灌、咸水入侵、地面沉降等现象，加剧了水资源紧缺，威胁人民健康，影响了工农业生产（王建中等，2006）。

我国是一个水资源紧缺的国家，随着人口和社会的发展，水资源短缺的现象将会进一步加剧，水资源短缺已经成为影响我国自然生态环境和社会经济发展面临的一个复杂且突出问题。随着我国水资源开发利用程度的提高，水资源开发潜力已经越来越小，以海河流域为例，该区域地下水严重超采，水资源开发利用已经达到 90% 以上，同时全国总供水量 2002—2004 年分别为 5497 亿 m^3 、5320 亿 m^3 和 5548 亿 m^3 ，总体变化不大。

在如此高的开发利用程度下，造成我国水资源短缺的一个重要原因就是我国水资源利用方式粗放、用水效率低、用水浪费突出。我国是一个灌溉农业大国，农业用水的 90% 以上用于灌溉，全国 2/3 的灌溉面积上的灌水方式比较粗放，全国地表水灌区每公顷次灌水量为 1200~1500 m^3 ，最高达 2258 m^3 ，地下水灌区达到 900~1050 m^3 ，高出适宜水量的 1~2 倍，同时农业输水渠道渗漏严重也造成了我国农业水资源利用效率低下，截至 2005 年，我国的灌溉水利用

系数平均为 0.45,远低于以色列、法国等先进国家 0.70 以上的水平。我国粮食作物水分生产效率为 1 kg/m^3 ,仅为发达国家的 1/2(张余良等,2004)。在工业用水中,我国工业用水效率与发达国家相比差距较大,万元产值用水量为发达国家的 5~10 倍,工业用水重复率为 50%,低于发达国家的 80%,与美国、日本 20 世纪 70 年代的水平持平(霍雅勤等,2003;陈转兰,2003)。在城市供水方面,全国城市供水平均损失率由 1996 年的 11.3% 上升到 2003 年的 13.9%,2005 年我国城市供水管网漏损率达 20% 左右,部分城市甚至超过 30%,我国供水损失率是欧洲发达国家的 4 倍左右(裴源生等,2008)。我国水资源利用效率全方位的低下更加加剧了我国水资源短缺的状况,因此如何在现有水资源开发利用程度下提高水资源利用的效率成为我国解决水资源短缺的一个重要方向。

水资源利用效益是水资源高效利用的核心要素之一,是一个国家或地区生产力、经济结构和节水水平的综合反映,提高水资源利用效率的最终目的是为了提 高水资源的利用效益。由于我国长期以来水资源浪费严重,农业用水比例过大,用水效率不高,造成我国水资源利用效益处于相对比较低的水平,按照《2000/2001 年世界发展报告》计算 GDP 用水效益,我国 1999 年单方耗水产出的 GDP 为 1.9 美元,为美国 GDP 用水效益的 10%、日本的 4.2%、德国的 4.1%。从购买力计算,我国单方耗水产出 GDP 为美国的 41.7%、日本的 23.4% 和德国的 20%。虽然随着社会经济发展及节水措施的引进,我国水资源利用效益有所提高,但仍远远低于国际先进水平。

由此看来,我国水资源不仅存在资源短板,与此不相协调的是我国水资源利用方式粗放,在生产和生活领域存在严重的结构型、生产型和消费型浪费,用水效率不高,水资源在各部门的经济效益和环境效益普遍低下,在现有水资源开发程度的情况下具有巨大的提升空间。然而,我国水资源利用效率和效益低下只是一个定性的认识,能否定量地对流域及区域的各部门水资源利用效率和效益进行表达是进行水资源利用调控及调控效果评价的基础。进行水资源利用效率和效益的定量评价有两个问题需要解决:

(1)从流域水循环过程出发,如何定量地进行区域水资源利用效率和效益评价? 评价的主要评价指标如何构建? 构建的指标主要耗水参数是什么?

(2)如何宏观地、快速地获取主要耗水参数? 如何实现指标中各参数的尺度一致性?

因此,有必要以区域的观点从宏观上对水资源进行利用效率和效益评价方法和技术进行研究,从而提高水资源利用经济效益和生态与环境效益的流域水资源优化调控提供理论支撑和指导,切实提高用水效率,促进水资源的可持续利用以支撑经济社会的可持续发展。

1.1.2 水资源利用效率与效益的内涵

水作为一种资源之所以能够被人类社会和生态环境所利用,是因为其具有可用性,能够为人类生产、生活提供相应的服务,这其中就包括经济服务功能和生态服务功能等方面。人类能够从水资源利用过程中获得相应的满足,耗水是人类社会和生态环境消费水资源的主要表现形式,其所得到的满足程度则即为取得的各种效益,包括经济效益、社会效益和生态效益。通过各种技术手段和措施,水资源被开发利用并进入经济社会系统或者由人工及天然生态系统直接利用,促进区域经济发展和生态系统改善、提高人类生存质量。

通过耗水获得的满足程度能够通过水资源利用效率与效益两方面的指标来得到衡量和体现。然而,水资源利用效率与水资源利用效益是两个不同的概念,在长期的研究工作中却经常对

二者进行混淆,因此,有必要对水资源利用效率和效益进行界定和说明。所谓水资源利用效率是指部门或行业用水过程中,其实际耗水量与取用水量的比值。它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。用水效率是从水量方面评价水资源的使用状况。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的资源根本特性。水资源利用效率是一个无量纲的指标,它体现了水资源在水循环及水资源利用各个环节中实际利用程度及相应的浪费程度,一定程度上反映了水资源利用的效果状况。

水资源利用效益是指人们通过对水的开发利用以后,能够给人类带来的益处,这也是人类利用水资源的根本目的。与水资源利用效率概念有所不同,水资源利用效益是从投入产出的角度分析实际耗水量与产出效益的比值,即单位耗水量产出效益。水资源利用效益评价指标实际是在经济角度上体现水资源利用产出效益,其与水资源利用效率不同,是一个具有明确量纲单位的指标,它体现了水资源消耗过程中所产生的对于人类生产、生活等方面的有益的社会、经济和生态产出效益。

水资源利用效率和水资源利用效益之间密切联系又有所区别。水资源利用效率体现的是水资源在利用各个环节中的水资源的消耗程度,即水资源消耗量与水资源总利用量的比值;而水资源利用效益体现的是消耗的水资源所产生的有利于人类生产、生活的社会、经济、生态服务功能效益。由此可见,提高水资源利用效率必然能够提高相应的水资源利用效益,而水资源利用效益是水资源高效利用的核心要素之一,是一个国家或地区生产力、经济结构和节水水平的综合反映,提高水资源的利用效率的最终目的是为了提高水资源的利用效益,从而为人类生产生活提供服务支持。

1.2 水资源利用效率与效益研究现状及趋势

1.2.1 水资源利用效率研究现状及趋势

正确合理进行水资源利用效率的评价是实现水资源高效利用和节水型社会建设的基础,从而为实现水资源规划管理提供理论支持。我国作为一个农业大国,农业用水占全国用水总量的70%以上,因此,对农业用水利用效率评价也是重中之重。从世界范围来说,国内外学者也把农业用水利用效率及效用作为水资源利用效率评价研究的重点。

对于水资源利用效率评价的理论和方法还没有统一系统的方法,目前国外使用较多的术语包括:灌溉效率(Marinus, 1979)、灌溉水利用效率(Wolters, 1992)、水分生产率(Molden, 1997)、作物水分利用效率(Perry, 1999)、水分消耗百分比(Molden, 1997; Perry, 1999),国外主要用利用效率来表述,而国内则用用水系数比较多(崔远来, 2009)。此外,国内经常使用的水资源利用效率评价指标还有作物水分利用效率(王会肖等, 2000)、水分生产率(沈荣开等, 2001a)、灌溉水利用效率(沈荣开等, 2001b; 蔡守华等, 2004),而灌溉用水效率、灌溉水利用率、灌溉水有效利用系数、水分利用效率、水分利用率、水分生产效率等术语也常在一些文献或报告中出现(田娟等, 2005; 王景雷等, 2004; 蔡甲冰等, 2004)。这些名词的具体含义比较混乱,有时可能表示传统“系数”定义中比例的概念,有时可能表示投入单方水的粮食产出即水分生产率,有时也可能表示蒸发蒸腾消耗水量占总灌水量(或供水量)的百分比。术语表达方式上的差异导致对水资源利用效率的研究更加复杂(崔远来等, 2009)。

传统对提高水资源利用效率的认识主要集中在对输配水过程及田间过程水量的研究。通过各种工程节水措施,减少水量损失,提高渠系水利用率和田间水利用率,达到提高水资源利用效率的目的(陈伟等,2005;姚治君等,2000;郑浩等,2005;艾莉莉等,2001;彭芳等,2005a,2005b;吴士章等,2005)。工程节水技术主要包括对灌区工程进行渠系配套与渠系防渗、管道化输水、喷灌、滴灌等项目改造,通过这些工程项目建设,减少灌溉用水量(张令梅等,2004;王立坤等,2004)。吴普特等(2003)通过在渠灌类型示范区采用渠道防渗和改进田面灌溉等技术实现农业高效用水,结果表明,示范区灌溉水利用系数提高到 0.76,2001 年粮食的水分生产效率 1.25 kg/m^3 。李艳丽等(2004)对兰考县引黄灌溉进行研究,说明 1992—2000 年采取各种喷滴灌等节水措施以后,节约引水量 1.09 亿 m^3 ,粮食增产 109.465 万 t,达到了节水高效的目的。蔡勇等(2004)运用投入产出关系定量模型,分析了低压管道、渠道防渗、砖砌渠道和浆砌石渠道四种节水措施下江苏地区总费用和总效益之间的投入产出关系。曲耀光(2002)指出,灌溉工程的输水损失是灌溉用水损失的主要组成部分,绝大部分消耗于渠系渗漏,主要是由于输水渠道防渗不力、工程老化失修和管理不善造成。段爱旺等(2002)通过提高输配水系统的用水效率,对西北各省区的节水潜力进行了分析计算,提出应采取的技术措施和技术途径。然而,目前许多实例都证明期望通过提高灌溉供水和输水效率的措施来提高水资源利用效率的做法是无效的,由此出现了所谓“字面节水”的提法(Molden,1997)。原因在于灌溉水利用系数、传统灌溉效率等指标忽视了回归水及其重复利用。在水资源充足时,一个灌区的主要目标是维持灌溉工程良好运行和根据作物需水及时供水到田间,为其他用途而节水并没有受到广泛关注。当水资源日趋短缺,灌溉用水对地区水循环的影响日趋重要,而从传统效率指标的角度来看,灌溉用水的使用效率不高,意味着效率提高将有大量的水可以从农业灌溉转移给其他用户。因传统效率指标忽略了损失水的再利用,所以仅仅利用传统效率指标来评估真实节水量和制定合适的节水策略是存在缺陷的。且不同的目标决定了不同的计算基础,目前还没有一套共同术语可以兼容各种不同使用目的所需的灌溉水利用效率指标。当灌溉成为流域水文的一个重要组成部分时,必须在更广泛的水资源管理背景下进行灌溉水利用效率分析。

鉴于此,近年来国内外学者基于水资源管理的观点提出了考虑回归水重复利用的灌溉水利用效率指标。1977 年 ICID(Marinus,1979)提出了灌溉效率标准,该标准将总灌溉效率划分为输水效率、配水效率和田间灌水效率,总灌溉效率为三者之积。国内一些学者(胡和平等,1999;杨胜敏,2005;李远华,2003,2005;阎星,2003)认为,农业灌溉将水自水源输送到农田,满足作物需要可以划分为三个环节:第一个环节是通过灌溉输配水系统,将水自水源引至田间;第二个是在田间地表水入渗到土壤中,在土壤中再分配转化为土壤水,而后被作物吸收;第三个是作物吸收水分后通过光合作用将辐射能转化为化学能,最后形成有机物质碳水化合物。无论哪种观点,对于提高用水效率来说,都要极大地提高灌溉过程中各个环节水的转化和产出效率,既节水又高产。传统灌溉效率被定义为作物消耗的灌溉水量占由地表或地下供给渠道或取水口的总灌溉供水量的比值。这一概念与我国采用的灌溉水利用系数类似。Hart *et al.* (1979)、Burt *et al.* (1997)等分别又提出了储水效率和田间潜在灌水效率等灌溉效率指标。尽管此后研究者提出了不同的灌溉效率指标,其强调点各有差异,但与早期定义出发点并没有太大区别,即其适用性仍与工程目标是息息相关的,高灌溉效率意味着有较高比例的引水量储存于作物根系层以增大作物蒸腾量。1979 年,美国 Interagency Task Force 组织(Us inter-agency task force,1979)研究发现,针对传统灌溉效率的理解有许多偏差和自相矛盾的地方,

指出根据灌溉效率值表明大量的水资源在此过程中浪费了,事实并不尽然,并开始注意到大型水利工程及流域中存在灌溉回归水的重复利用问题。此后的几十年间,灌溉水利用效率指标体系的内涵主要向两个方向发展:一方面是针对“有益消耗”与“无益消耗”、“生产性消耗”与“非生产性消耗”的界定(Molden,1997);另一方面则是回归水的重复利用问题受到广泛关注,越来越多的研究者(Wiilardson *et al.*,1994;Keller *et al.*,1996)认为,使用传统的“灌溉效率”需要充分认识研究对象的边界特点,局部的灌溉效率在更大的尺度范围内并不重要,并考虑如何将回归水要素加入指标体系中,以正确指导人们的节水行为,制定合适的节水策略。一系列新的用水效率类指标被提出,Jensen(1977)指出,传统灌溉效率概念在用于水资源开发管理时是不适用的,因为它忽视了灌溉回归水,从水资源管理的角度,Jensen提出了“净灌溉效率”的概念;Molden(1997)在其提出的框架中采用了总消耗比例及生产性消耗比例指标;Perry(2007)建议采用水的消耗量、取用量、储存变化量及消耗与非消耗比例为评价指标,并认为可保持与水资源管理的一致性。Lankford(2006)认为,当考虑到使用条件及评价目的时,传统灌溉效率与目前提出的考虑回归水重复利用的有关灌溉效率都是适用的。Lankford列出了影响传统灌溉效率的13个因素,包括:水管理范围的尺度大小,设计、管理和评价的目的性不同,效率与时间尺度的关系,净需水量与可回收及不可回收损失的关联等,同时提出可获得效率的概念,即现有损失中有些是可以通过一定的技术措施予以减少的,比如渠道渗漏,而有些是难以减少的,比如渠道水面蒸发损失,因此,效率的提高只有通过减少可控的损失量来实现。沈荣开等(2001b)研究表明,内蒙古河套灌区干、支、斗、农渠道全部防渗后,渠系水利用系数可由0.42提高到0.70,灌溉水利用系数由0.35提高到0.60,但去掉渠道水面蒸发、尾水排泄、渠旁侧渗潜水蒸发后,补给地下水量甚微;而在局部实行衬砌后,地下水的重复利用率可增加26.4%,灌溉水利用效率提高到72.4%,灌溉水利用效率比全面推行渠道衬砌后提高了12.4%。湖北漳河灌区平均灌溉水利用系数只有0.43,从传统的观点看有57%的灌溉水损失,然而实际上平水年在水稻灌溉季节只有12%的降雨和灌水形成径流流出灌区(李远华等,2005)。因此,从减少区域出流的角度,在灌区尺度上最大的节水潜力为12%。分析表明,上述57%的损失量中的大部分被小尺度的塘堰、中小型水库和排水沟收集并且再利用。

不少学者还对渠道越级输水、并联渠系输水等情况下渠系水利用系数的计算分析与修正进行了研究探讨。例如,高传昌等(2001)提出将渠系划分为串联、等效并联、非等效并联,分别引用不同的公式计算。汪富贵(1999)提出用3个系数分别反映渠系越级现象、回归水利用及灌溉管理水平,再用这3个系数同灌溉水利用系数的连乘积获得修正的灌溉水利用系数。沈小谊等(2003)提出用动态空间模型的方法计算灌溉水利用系数,考虑了回归水、气候、流量、管理水平和工程变化等因素的影响。沈逸轩等(2005)提出年灌溉水利用系数的定义,即1年灌溉过程中被作物消耗水量的总和与灌区内灌溉供水总和的比值,并给出相应计算方法;谢柳青等(2001)结合南方灌区的特点,在分析确定灌溉水利用系数时,根据灌溉系统水量平衡原理,建立了田间水量平衡数学模型,利用灌区骨干水利工程和塘堰等供水量统计资料,由作物的灌溉定额,反推灌区渠系水利用系数和灌溉水利用系数。近年来,一些研究院所开始研究灌溉用水水利用系数的宏观测算分析方法及灌溉水利用效率评价的宏观方法,如首尾测算分析法(中国灌溉排水发展中心,2007)。即定义灌溉水利用系数为田间实际净灌溉用水量与毛灌溉用水量的比值,并强调以年为周期进行计算(与沈逸轩及谢柳青等的方法类似)。其中毛灌溉用水量是指灌区从水源地实际取水的测算统计值,不能忽视从灌区其他水源(塘坝或其他水库)的取水值。

日前,国内一些学者已经开始认识到灌溉水利用系数内涵的局限,提出了一些考虑回归水利用的指标。蔡守华等(2004)综合分析了现有指标体系的缺陷,建议用“效率”来代替“系数”,并在渠道水利用效率、渠系水利用效率、田间水利用效率之外增加了一个作物水利用效率。陈伟等(2005)认识到用现有灌溉水利用系数等指标计算节水量的局限性,指出计算灌溉节水量时应扣除区域内损失后可重复利用水量,并提出了考虑回归水重复利用的节水灌溉水资源利用系数的概念。但并没有明确计算中涉及的参数如渠系渗漏水转化为地下水百分比、地下水开发利用率、扣除蒸发损失的系数等如何确定。Seckler(1996)指出,在小尺度范围内的水量损失可以在更大尺度范围内重新利用,对于灌溉水利用效率的错误认识可能会导致对节水潜力的错误估算。茆智(2005)指出计算节水潜力时考虑尺度效应的重要性。李远华等(2005)及崔远来等(2007)以湖北漳河灌区为例,分析表明基于水量平衡得到的节水潜力远小于基于灌溉水利用系数得到的节水潜力。陈伟等(2005)认为,从水资源角度考虑灌溉节水潜力,应扣除区域可重复利用水量,提出了考虑灌溉渗漏水重复利用的灌溉水资源利用系数指标,探讨了区域节水潜力评价的新方法。

从针对水资源利用过程中的“有益消耗”与“无益消耗”、“生产性消耗”与“非生产性消耗”出发进行水资源利用效率评价是当今比较热门的一种方法。如 Willardson *et al.* (1994)建议采用“比例”的概念来代替田间灌溉效率指标,如消耗性使用比例指的是作物蒸发蒸腾量占田间灌溉水量的百分数;Keller *et al.* (1996)提出“有效效率”的指标,指的是作物蒸发蒸腾量同田间净灌溉水量之比,田间净灌溉水量为田间总灌水量减去可被重复利用的地表径流和深层渗漏,Keller *et al.* 认为,有效效率指标可用于任何尺度而不会导致概念的错误,王浩等(2003a)指出农业水资源高效利用的目的是使生产过程中水分损失减少,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,从而通过减少无效蒸发以提高水资源利用效率。裴源生等(2007)从区域水资源量消耗的角度提出耗水节水的概念,即考虑各种可能节水措施背景下的耗水与不采取节水措施的耗水差值,认为耗水节水量表明区域实际蒸发蒸腾消耗的节水量,体现了区域真正的节水潜力。

2000年由世界银行资助的国际合作项目《真实节水量研究》(沈振荣等,2000;周忠生,2003;蒋礼平,2003)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。中国水利水电科学研究院水资源所在1999年完成的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》(谢新民等,2003)中,针对宁夏灌区的实际情况,提出了以区域耗水量的变化作为水资源高效利用的评价指标,用取水量的变化作为参考指标。廖永松(2005)指出以流域为尺度的灌溉效率提高的节水措施主要在于“资源型”和“效率型”节水:“资源型”真实节水量主要为农田水分循环系统中不可回收水量;“效率型”真实节水主要体现在水量与产量的转化效率上,即达到在等同水分消耗条件下大幅度地提高产量,或在取得等同作物产量的条件下,大量减少蒸发蒸腾量使农田的净消耗水量显著降低(沈振荣等,2000)。即指减少无效蒸腾蒸发量和其他不可回收水量或者降低平均单位粮食产量的净耗水量,即所谓的“真实节水”。

随着人类活动对流域水循环过程影响的深度和广度的加深,流域水循环的内在驱动力呈现出明显的二元结构,在强烈人类活动干扰地区,这种人工作用下的影响越来越大,在某些方面甚至超过了自然作用力的影响。水循环的自然生态系统和人工系统也表现得越发明显。越来越多的学者也开始研究人工系统中的水资源利用效率。郑在洲等(2004)在分析工业节水潜

力用以提高工业用水效率时指出,工业节水量不仅要考虑现状工业通过节水措施所能节约的水量,还要考虑未来新发展用户通过节水措施所节约的水量,总节水量应等于二者之和。李永根(2002)在收集了全国近200个城市1985—1998年约7000组用水节水数据的基础上,建立了“工业节水单方水投资与单耗指标关系曲线”。祁鲁梁等(2005)指出,提高工业用水重复率和发展高效冷却水技术,提高冷却水利用效率,减少冷却水利用量是工业节水的重点之一。工业洗衣机是用水量较大的设备,王建民(2005)认为对工业洗衣机的进水和排水进行自动控制,将水质较好的漂洗废水重复利用,实现废水资源化,节水可达50%。贾绍凤等(2004)分析了北京产业结构调整对平均工业用水定额下降的贡献,结果表明,产业结构调整比部门结构调整对节水的作用更大,前者约占整个节水贡献率的90%。总体来说,工业和其他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,或者对具体用水工程的工程效益评价、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(陈莹等,2005;雷波等,2004;裴源生等,2006;来海亮等,2006)。

随着对“自然—人工”二元水循环理论的理解不断深入,学者越发认识到单独的对某一部门局部对水资源利用效率进行评价是片面的,甚至会得到错误的结论。对水资源利用效率的评价需要从区域的观点出发,整体考虑自然水循环与社会人工水循环的各个环节的水资源的利用效率,不仅包括农业、工业,还包括生态和生活等各个方面,不仅需要考虑地表水、地下水等水资源,还应该考虑包括降水产生土壤水在内的水资源。邓绍云等(2004)认为,评价一个灌区的节水灌溉水平,应站在全局的立场上考虑,建议选用作物水生产率、降水有效利用系数、灌溉效率、灌水均匀度、耗水系数及占地率来评价。张丽萍等(2004)探讨了我国节水灌溉效益评价研究的特点及展望。葛书龙(1993)采用工程、用水、经营、产出4大类12个子指标,运用灰色系统理论,对苏北水利工程进行了评价;赵会强等(1999)采用工业节水指数、农业节水指数、城市生活节水指数、水量大小、牲畜用水定额等指标,运用B-P神经网络理论,以河北省11个市为例,进行了区域节水水平综合评价。傅林霞(2004)和郭宗楼等(1999)曾在研究新疆塔里木农业灌溉工程中,提出了灌排工程项目环境影响评价指标体系及其模型,包括自然环境、生态环境、人文经济3大类26个指标。齐学斌(1994)分析了节水的生态环境效益,包括节水对地表水环境、地下水环境、土壤等的影响。姚崇仁(1995)在农田灌溉节水潜力综合评价中,认为影响农田灌溉节水潜力的因素很多,有自然、政治、经济等多方面的因素,必须综合考虑。另有一些学者(罗金耀,1997;李元炎,2004;邱林等,2005;吴景社等,2003,2004)也指出,节水灌溉应注重综合效益,包括经济、环境和社会效益。张伟天(2004)指出要采取建立高效的农业用水协调机制,构建农业水资源集中流域管理体制,妥善处理农业用水与其他用水的关系,提高农业用水效率。康绍忠等(2004)在分析国内外农业与生态节水热点和难点问题的基础上,指出未来农业与生态节水的重点应注重研究区域尺度的水平衡关系,及改变的生态环境效应定量评估指标体系和方法,评估因不同区域节水灌溉发展对区域水循环的影响及其生态环境效应。王景雷等(2004)指出,随着研究的深入和人们对生存环境的重视,社会和环境效应评价成为节水农业综合评价的主要内容之一。由于评价主体和目的的不同,选择的评价对象和评价尺度也有所不同。农户关心的是当前实实在在的增收和节支,评价的对象可能只是某一具体的灌溉措施的经济效能,即小尺度单效能评价;而政府关注的不仅是区域的各种不同的节水农业措施的经济效能,更多的是关注节水农业的社会和环境效能,不仅关注当前的各种效能,而且更注重效益的可持续发挥,即大空间、长期的综合评价。因此,在节水农业评价时,必须根据

评价主体和评价目的确定适宜的时间和空间评价尺度(廖永松,2006)。任建华(2005)针对黑河流域中游水资源过度开发给下游带来了严重的生态恶化问题,指出应该从黑河流域角度出发,研究水资源的合理开发与生态环境保护之间的关系。樊菊平等(2003)认为,水资源的高效利用首先应遵循水资源的可持续开发与环境的保护,针对汉中水资源的利用现状,提出了相应的水资源高效利用措施。徐学选等(2003)以县域为研究尺度,将水资源高效利用研究尺度扩展,对黄土丘陵区安塞县的农业水资源高效利用进行了研究,探讨了水资源高效利用的潜力及实现途径。康绍忠等(2004)提出,必须进行流域内水资源的合理配置,从流域内部以“提高水资源利用效率和效益”为中心,加强水资源的科学管理,有效控制需水量的增长,使现有的水资源得到合理、高效、持续的利用。邵晓梅等(2005)从分析黄河流域水资源开发利用现状入手,提出其节水高效农业建设的紧迫性,尤其对旱作农业,指出以提高水资源利用率和提高水资源利用效率的节水潜力很大,并定性地探讨了相应的节水途径。

水资源利用效率评价的发展经过了从单一评价工程效率、水资源利用各个环节效率总体评价到宏观考虑区域及人工水循环的过程,取得了一定的成果,但就目前水资源利用效率评价的研究来说,完整的系统的区域/流域水资源利用效率评价理论和方法还没有形成,这是由于或多或少地忽略了区域/流域的整体性,在水资源利用效率评价过程中对区域内部不同部门、不同区间的水利联系理解不全面造成的。综合来说,主要存在以下4个方面不足(裴源生等,2009):

①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水资源利用效率和效益;

②在水资源利用效率评价对象上不系统,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评价;

③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考察和研究不够;

④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。

1.2.2 水资源利用效益研究现状及趋势

水资源利用效益是指经济社会系统与自然生态系统在水资源的利用过程中能够带来的益处,也是人类利用水资源的根本目的。水资源利用效益可分为水资源使用价值和在水资源存在价值两部分。水资源使用价值是指水被使用时,满足人类或其他物种某种需要或偏好的能力,可分为直接使用价值和间接使用价值。直接使用价值是使用水或水资源产品直接带来的效用;间接使用价值是水资源或水体在满足人类生存、发展及维持生态系统平衡等方面体现出来的价值(程金香等,2004)。

在传统的以经济建设为中心的发展阶段,对水资源利用效益进行评价的过程中,往往采用经济量化的方法对水的利用效果进行衡量,即以水资源利用能够产生的经济效益,也称为狭隘的水资源利用效益。在国外,早期探讨水资源利用效益是在20世纪70年代,认为水的价值是在给定时间和给定地点来购买单位体积水的社会意愿和能够支付的最大值,或者采用机会成本的方法,即在既定时间、地点和水流条件下,当另外某人取走用水时,水资源所有者可以接受的每单位水的最小费用。杨格和格雷在1972年考察了几项实验,认为水的价值不可能超过最经济水源的边际成本(姜文来,1995)。边际效用价值论认为(王浩等,2003b),效用是价值的源泉,是形成价值的必要条件,效用同稀缺性结合起来,形成商品的价值;边际效用是衡量价值

量的尺度。运用效用价值理论很容易得出水资源具有价值的结论。因为水资源是人类生活不可缺少的自然资源,无疑对人类具有巨大的效用。随着水资源短缺成为全球性问题,水资源满足既短缺又有用的条件,因此,水资源等自然资源具有价值。效用价值论确实有其科学因素,但也同样存在缺陷(姜文来,1999):①将商品的价值混同于使用价值或物品的效用;②效用本身是一种主观心理现象,效用价值理论将客观的经济问题转化成主观的心理范畴,抹杀了水资源价值所反映的经济内涵。因此,尽管效用价值理论得出水资源具有价值的结论,但由于该理论存在着上述各种缺陷,建立在有缺陷的理论基础之上的水资源价值论是不完善的。20世纪80年代后期,水资源危机加剧,许多学者提出用经济杠杆调节水资源供需矛盾,指出了价格是节约用水的重要参数。1984年 Fakhraei(1984)研究了在随机供水情况下价格稳定性和水量配给规律,他认为定额分配水资源经济效益未曾从随机供水角度加以分析,他给出了两种形式的定额量,并推出可获取最大利润的长期价格。1987年 Moncur(1987)研究了城市用水定价和干旱对策。1988年 James *et al.* (1988)又对水资源价格在干旱条件管理中的作用进行了分析,结果表明,当水价有足够的弹性时,通过征收干旱附加税调节用户用水,可避免限量供水所带来的一系列问题,干旱附加税可促进采取节水措施,如果同时加强宣传教育则效果更加明显。Murdock *et al.* (1991)分析研究了用水预测中社会经济和人口统计特性的作用,指出人口统计和社会经济变量如住户年龄、种族、家庭成员的组成对用水量有很大的影响。1995年在瑞典召开的城市地区水综合管理国际研讨会上,水资源和废水定价被列为重要的一项议题。在纳米比亚,Glenn-Marie Lange 等人对已有的水资源评价方法进行了广泛的讨论,根据数据资料情况采用残值法对纳米比亚南部3个农场商业区的农业用水进行了初步尝试性的经济评价,并为水务部门制定水资源政策提供了适当建议。他们认为,残值法应用简单,适于评价水作为主要中间投入的农业用水。该研究代表了一个重要阶段:将经济原则引入了水资源的管理与定价中(United Nations Statistics Division,2006)。

国内方面,1987年,李金昌翻译了雷佩托的《关于自然资源与折旧问题》及L. 洛伦兹的《自然资源核算与分析》等研究报告,同时相继发表了《资源核算应列入国民经济核算体系》等有关论文(姜文来等,1996),对我国的水资源核算研究起到了极大的推动作用。1988年我国开始了“水资源核算及其纳入国民经济核算体系”研究的初步尝试。颜振元(1988,1993)在研究了水资源开发利用过程中的劳动消耗后提出,水资源的价格具有自然性、社会性和不确定性。黄贤金(1994)提出了自然资源二元价值论,即认为自然资源物质无价值,自然资源资本具有虚幻的社会价值,对其估算不能就资源论资源。张志乐(1996,1997)认为,地租理论是天然水资源价格计算的基础,并提出了水资源费或者间接水价的基本计算方法。姜文来(1999)出版国内外首部以水资源价值为论题的专著《水资源价值论》,从不同角度探讨了水资源价值的来源,阐述了与水资源价值相关的多方面理论。沈大军等(1999)首次系统地总结了国内外水价制定与实施的各种理论方法,进行了大量基础性研究工作,形成专著《水价理论与实践》,并应用所建立的CGE模型对邯郸市进行了实例研究,是该研究领域的一个开拓性工作。温善章等(1993)运用影子价格法研究了黄河部分河段水资源价值,结论是黄河各河段水资源影子价格存在明显的差异。1994年中国环境与发展国际合作委员会利用边际机会成本理论研究水资源定价模型,并选择北京(长期缺水代表)与上海(丰水代表)两个典型地区,分别进行了水资源价格测算并提出了水资源价格政策。姜文来等(1994)采用供求定价法研究了北京市水资源的价格。张晋光等(1996)研究了太原市水资源价格的构成,提出了太原市水价改革构想。

2000年,贾绍凤等(2000)研究了水价提升对华北地区水资源需求所产生的影响。孙广生等(2001)运用平均成本定价法研究了西安市自来水公司满足供水成本的水价和到位的综合水价。2002年孙风华(2002)对北京市合理供水水价体系建设提出了设想。毛春梅(2003)以水资源价值理论为基础,从黄河全流域水资源优化配置角度出发,以利用水资源获得最大经济效益为目标,测算了黄河水资源的理论价值,为制定黄河水资源费的征收标准提供了科学的理论依据。

随着水资源学的不断系统和深入,又有学者提出水资源的利用不仅要注重其经济效益,还要从社会学角度考虑水资源的使用状况,即水资源的社会效益。这主要是由于水资源具有公益性和非他性特征,这种特征要求全体社会成员都拥有同等使用水资源的权利和行为,不能存在地域之间、个人之间及阶层之间的歧视和区别,必须公平对待、公正使用,既关注同代人的使用,还要注重代际间的公平。2003年,罗定贵(2003)从水资源价值系统是一个极为复杂的系统出发,根据“不相容原理”,采用模糊数学方法弥补经典数学的不足,对抚州市应用二级模糊综合评价法进行了水资源价值的评价。2005年,曹剑峰等(2005)认为,水资源价值系统受自然因素、经济因素和社会因素等多因素的影响,是一个“灰色系统”,因此可用灰色理论评价水资源的价值。他们研究了灰色聚类分析的基本方法和确定水资源价值各影响因素权重的层次分析方法,以郑州市为例进行了水资源价值计算,验证了灰色理论在水资源价值评价中的适用性。中国水利水电科学研究院水资源所在其承担的“华北地区宏观经济水资源规划管理的研究”中,采用了投入产出模型与线性规划模型相结合的方法建立了华北地区宏观经济的水资源优化配置模型,为将市场经济机制引入我国水资源管理研究做了开拓性的工作(王浩等,1999)。之后,由水利部、中国科学院、国土资源部共同主持的“西北地区水资源合理开发与生态环境保护研究”项目中,为西北地区各流域开发建立了宏观经济水资源模型,为西北地区的水资源开发利用提供了依据。

随着水资源短缺形势的日益严峻,水资源供需矛盾越来越突出,生态缺水问题也越来越严重,社会的发展和文明的进步迫使人们逐渐认识到维护生态系统、改善生态系统的重要性,于是,水资源利用效益又扩充到生态系统方面,使其内容更加系统完善,不仅要获得经济社会发展所要求的经济社会效益,还要实现维持和改善区域生态系统正常功能发挥的生态效益,即此时的水资源利用效益应包括三个方面:经济效益、社会效益和生态效益。这就要求在对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,不能顾此失彼,只有这样,才能科学合理地利用水资源,促进区域资源、经济、社会与生态协调健康发展。近年来,人们已经逐渐认识到保护生态环境的重要性,并在相关的水资源开发利用过程中,注重对生态的维持和改善,保证一定的生态消耗水量,尽量在不破坏生态系统的前提下,确保生态功能的正常发挥,但是在对生产实践所产生的经济效益进行国民经济核算时,却忽视了生产过程中对自然资源的消耗及对生态资源的破坏所付出的代价。因此,在计算国民经济净产出时,除扣除原始投入外,还应扣除生产过程中对资源的损耗及牺牲生态所付出的代价,即应以绿色GDP来科学评价效益产出(高旺盛等,2005)。1993年车江洪(1993)根据马克思的再生产理论,详细阐述了水资源等自然资源生态价值理论的内涵。倪红珍等(2003)将水资源生态价值定义为:站在社会整体的角度,以环境的变化对水资源的影响评价或者水资源变化对环境的影响评价为主要研究内容,用经济的方法综合评价水资源,以便较科学地进行水资源定价。张金萍(2007)等通过计算生态系统服务价值的方法进行了水资源利用生态效益的评价。秦嘉励等(2009)通过野外实地调查和已有文献资料分析,初步核算了岷江上游典型生态系统的水源涵养量;并利用生