

# 灌溉水利用效率指标研究进展

崔远来, 熊 佳

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘要:**回顾了灌溉水利用效率评价指标的发展历史, 分析了现有灌溉水利用效率评价指标的不足, 总结了其适用条件。结果表明, 目前还没有一套在任何条件均适用的灌溉水利用效率评价的量化指标, 原因在于: 一是不同灌溉水利用效率指标术语内涵不明确, 导致在不同条件下很多指标被混用; 二是部分指标即使理论框架比较清晰, 但在实际运用时, 许多计算要素难以确定或是无法确定, 不利于在灌区水管理中推广。指出对现有灌溉水利用效率指标进行科学的界定和评价, 规范不同指标的使用范围, 研究它们之间的相互关联规律、影响因素, 探讨节水潜力评价方法的重要性。

**关键词:**灌溉水利用效率; 灌溉效率; 水分生产率; 评价指标; 节水潜力

**中图分类号:** S274.1; G353.11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-6791(2009)04-0590-09

灌溉水利用效率指标综合反映不同尺度灌溉工程状况、用水管理水平和灌溉技术水平等, 是正确评估灌溉水有效利用程度及存在问题, 评价节水灌溉发展成效的重要基础。尽管过去国内外许多部门和学者对灌溉水利用效率的指标开展了许多研究, 但多基于动水法或静水法进行灌区样点渠段的测算分析; 而以水分生产率为代表的灌溉水利用效率测算与评价则基本以测坑或田间小区试验数据为基础。这些工作存在概念与测算口径不统一、测算工作量大、影响因素及机理不清、以点带面等诸多问题。目前, 许多实例证明期望通过提高灌溉供水和输水效率的措施来节水的做法是无效的, 由此出现了所谓“字面节水”的提法<sup>[1]</sup>。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。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<sup>[1-6]</sup>。然而, 这些指标及框架在强调其理论及概念合理性的同时, 却忽视了其实用性, 即难以确定其中的某些要素, 因此并不适用于灌区的水管理。所以对现有灌溉水利用效率评价指标进行合理的界定和评价、探讨新的适宜指标十分必要。

## 1 灌溉水利用效率的内涵

国际灌排委员会 ICID 于 1977 年对灌溉效率术语进行正式定义<sup>[7]</sup>。目前国外使用较多的术语包括: 灌溉效率<sup>[7]</sup>、灌溉水利用效率<sup>[8]</sup>、水分生产率<sup>[1]</sup>、作物水分利用效率<sup>[5]</sup>、水分消耗百分比<sup>[1,5]</sup>, 其中作物水分利用效率的含义往往与水分生产率的含义类似。

国际上通用的表述方式是“效率”, 而国内习惯用“系数”来反映灌溉水的有效利用程度。中国《农村水利技术术语》<sup>[9]</sup>定义灌溉水利用系数为: 灌入田间可被作物利用的水量与渠首引进的总水量的比值。在国内现有权威出版物中并没有对国外广泛使用的灌溉效率进行专门定义和解释, 只是认为其含义与灌溉水利用系数相似。这也是国内对灌溉水利用效率术语的理解和使用特别混乱的原因之一。

**收稿日期:** 2008-06-30

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50879060; 50839002; 50579059); 水利部公益性行业专项经费资助项目(200701002)

**作者简介:** 崔远来(1966-), 男, 江西武宁人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事节水灌溉理论与技术及水资源管理方面研究。E-mail: cuiyuanlai @263.net

除灌溉水利用系数<sup>[9]</sup>等外,国内经常使用的灌溉水利用效率指标术语还有作物水分利用效率<sup>[10]</sup>、水分生产率<sup>[11]</sup>、灌溉水利用效率<sup>[11-12]</sup>,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、水分生产率等术语也常在一些文献或报告中出现<sup>[13-15]</sup>。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。由于术语表达方式上的差异导致对灌溉水利用效率的研究更加复杂。

灌溉水从水源到形成作物产量要经过4个环节:①通过渠道或管道将水从水源输送至田间;②将引至田间的灌溉水,尽可能均匀地分配到所指定的面积上,并转化为土壤水;③作物吸收、利用土壤水,以维持其生理活动;④通过作物复杂的生理过程,形成经济产量。前两个环节效率的提高表现为尽可能将水源取水输送到田间并储存于作物根系层,其效率用无因次的百分比表示,比如灌溉效率,灌溉水利用系数;后两个环节则是尽可能使作物高效利用土壤水以提高产量,其效率常用投入单方水的粮食产出( $\text{kg}/\text{m}^3$ )表示,比如水分生产率。相同灌溉定额下,灌溉制度不同,降雨的有效利用不同,作物生长发育及最终产量也存在差异,因此,水分生产率与灌溉行为密切相关。由于作物灌溉的最终目的是提高作物的产量和品质,“灌溉效率”类指标表达了多少水可以输送到田间并储存于作物根系层被作物所利用,而“水分生产率”类指标则表达作物吸收和利用水分形成产量过程中的效率。只有两者都高效,灌溉行为才是高效的。因此,从广义上理解,本文提出灌溉水利用效率(Irrigation Water Use Efficiency, IWUE)指标是指所有与灌溉水利用的效率及效益有关的指标,包括灌溉效率、水分生产率、水分消耗比例及水分有益消耗比例等。

## 2 灌溉水利用效率指标及其确定方法

### 2.1 灌溉效率

(1) 国外研究进展 灌溉效率是灌溉水有效利用程度的主要评价指标之一。在 Israelsen 定义的基础上,1977年 ICID<sup>[7]</sup>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。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。这一概念与中国采用的灌溉水利用系数类似。之后 Hart<sup>[16]</sup>、Burt 等<sup>[17]</sup>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<sup>[18]</sup>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”以及“生产性消耗”与“非生产性消耗”的界定<sup>[1]</sup>;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<sup>[19-20]</sup>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。一系列新的灌溉效率类指标被提出,如 Willardson 等<sup>[19]</sup>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 等<sup>[3]</sup>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 等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;Jensen 等<sup>[2]</sup>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<sup>[1]</sup>在其提出的框架中采用总消耗比例及生产性消耗比例指标;Perry<sup>[5]</sup>建议采用水的消耗量、取用量、储存变化量以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<sup>[21]</sup>认为当考虑到使用条件及评价目的,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,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。

(2) 国内研究进展 中国现行的灌溉水利用系数指标体系及计算方法主要形成于 20 世纪五六十年代,当时主要参照前苏联的灌溉水利用系数指标体系而建立。国内普遍应用灌溉水利用系数这个指标评价灌溉水利用效率,研究分析的重点在测定渠系水利用系数和田间水利用系数的方法、计算公式修正等方面。特别是测定和评价渠系水利用系数是研究确定灌溉水利用系数的主要难点。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。如高传昌等<sup>[22]</sup>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<sup>[23]</sup>提出用 3 个系数分别反映渠系越级现象、回归水利用以及灌溉管理水平,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<sup>[24]</sup>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<sup>[25]</sup>提出年灌溉水利用系数的定义,指 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<sup>[26]</sup>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水利用系数的宏观测算分析方法以及灌溉水利用效率评价的宏观方法,如首尾测算分析法<sup>[27]</sup>。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。

目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<sup>[12]</sup>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<sup>[6]</sup>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等如何确定。

## 2.2 传统灌溉效率的局限性及节水的尺度效应

在早期规划开发灌溉系统时,只注重优化系统的设计。中国《灌溉与排水工程设计规范》中灌溉水利用系数连乘计算的方法与灌区设计思路相一致,各项参数具有明确的实际意义,各级渠道水利用系数和田间水利用系数也可以通过广泛熟悉的方法获取,灌溉水利用系数一直以来被作为灌区灌溉用水评价的一个最重要的指标。目前正在全国开展的灌区续建配套建设,在工程规划和效益评估时,也主要以该指标为基础计算“节水量”,进而得出节水效益。但实际上仅仅利用传统指标来评估真实节水量和制定节水策略是存在缺陷的。

首先用灌溉水利用系数进行全灌区灌溉水利用效率测算时,由于灌区条件的千差万别,往往存在概念与测算口径不统一、测算工作量大、准确性难以保证、影响因素及机理不清等诸多问题。使数据可信度和可比较性降低,不宜用于宏观层面上的决策依据。再则这种传统灌溉效率忽视了回归水的重复利用,将供水系统的出流全部视为损失。比如一般地面灌溉系统的渠系水利用系数平均为 42%,而喷微灌的输水效率却可达 70%到 90%。因而推断从地面自流灌溉转换到喷微灌可节约大量的灌溉用水并可转为其他用途,这种推断并不一定正确。答案取决于对研究区域尺度出流的有益使用为正(有水的重复利用)或是负数(无水的重复利用)。

沈荣开等<sup>[28]</sup>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 57%的灌溉水损失了,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<sup>[29]</sup>。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。

由此可见,节水灌溉存在尺度效应,即节水灌溉措施在各个尺度上的节水效果存在差异,以及一种尺度上的节水效果对其它尺度节水效果的影响是不同的<sup>[30-32]</sup>。由于回归水的相当部分可以在其它尺度被重新利用,使得灌溉系统及流域尺度的节水量并不是田间尺度节水量的简单累加,同时由于回归水在不同的尺度上所包括的内容及数值不同,存在某种复杂的转化关系,由此产生了尺度效应。此外节水尺度效应还源于对不同尺度节水效果进行分析所采用的方法之间的差异性,以及不同灌溉水利用效率评价指标间的差异。理解了这种节水的尺度效应,才能采用正确的评价指标,对拟采取的节水措施在不同尺度上的真实节水潜力作出正确的评估。

因此本文认为传统灌溉效率指标仅仅在以下情况是可用的:①新的灌溉系统的规划设计,此时灌溉工程设计者需要传统效率指标来推算为满足田间灌溉的基本需求而需要从水源调用的流量、以及基于不同级别渠道的流量设计渠道的断面尺寸;②评估渠道系统的管理状况,在灌溉工程状况一样时高灌溉效率意味着良好的管理状况;③在一个低效率的水重复利用系统中,尽管回归水可以回收并且可被作物或其他用户再利用,如果回用滞后期过长则不能及时满足用水户。并且还要考虑回归水的水质和利用成本问题。传统灌溉效率指标不适用于节水量的计算和节水潜力评估。

实际上不同时期和针对不同用途的灌溉水利用效率指标以及不同主体对灌溉水利用效率的理解是不相同的<sup>[5]</sup>。尽管传统效率指标在灌溉系统的规划设计及灌溉工程性能评估中都发挥了重要作用,在 20 世纪 50 年代到 70 年代新系统建设中尤为明显。然而当时水资源充足,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,为其它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。

### 2.3 水分生产率

水分生产率是指单位水资源量在一定的作物品种和耕作栽培条件下所获得的产量。水资源量包括降水量、毛灌溉水量、蒸发蒸腾量。灌溉水分生产率指每单位灌溉水所能生产的农产品的数量。水分生产率指标用简单和易于理解的方式表达了水的产出效率,被广泛用于水管理评估。IWMI<sup>[1]</sup>提出的水量平衡框架中水分生产率被作为灌溉水利用效率的主要评价指标之一。由于水分生产率的数据来自水平衡分析的各要素,数据量大,并且有些要素测定较为复杂,限制了它在大尺度及长时段的应用。另外,水分生产率的提高可能来自其它因素提高了单位面积产量,因此单独使用水分生产率来评估灌溉效果也不一定合适。Guerra 等<sup>[33]</sup>建议联合使用水分生产率及灌溉效率来评估水管理策略和措施。

ZoebI<sup>[34]</sup>认为用水分生产率来描述灌溉水利用效率是不科学的,因为水的投入不一定全部被作物所利用,同时作物生长受控于其他很多因素。当考虑作物种类、管理水平及气象条件的差异性所导致的水分生产率的变化时,用该指标进行比较和评价变得毫无意义。同时作者认为传统灌溉效率在特定条件下仍然是有效的,特别是针对灌溉系统尺度,因为传统灌溉效率与灌溉系统的管理密切相关。因为技术及社会经济的多样性,对不同的评价目的应采用不同的水分利用效率评价指标。沈荣开等<sup>[11]</sup>认为水分生产率的定义应是单位面积作物的单位水分消耗(单位面积的作物腾发量)所获得的籽粒产量。由于受农作物方面、灌溉技术方面以及自然条件的影响,该值并不由供水条件唯一确定。作者指出,当前在运用水分生产率方面很不统一,这样十分不利于相互

之间的交流,容易造成误解,乃至得出错误的结论,因此很有必要加以规范。

## 2.4 IWMI 提出的水量平衡框架及灌溉水利用效率评价指标体系

鉴于灌溉排水行为对流域水文循环的重要性,国际水管理研究院近 20 年来将工作重点从灌溉管理转向流域水资源的管理。其名称从国际灌溉管理研究院(IIMI)改为国际水管理研究院(IWMI)与此不无关系。他们从水资源利用的角度分析了传统灌溉效率的弊端,并提出新的灌溉水利用效率评价理念<sup>[4]</sup>。Molden<sup>[1]</sup>提出了水量平衡的分析框架,确定了该框架模型在田间、灌溉系统以及流域 3 个尺度范围内进行水量平衡计算的具体过程。并提出了进行水资源利用效率评价的 3 类指标,即水分生产率、水分消耗百分率,水分有益消耗百分率。基于这一框架, IWMI 研究人员先后针对多个流域开展了实际研究<sup>[35-37]</sup>,其中 Molden<sup>[35]</sup>在原有基础上又提出了相对水量供应比和相对灌溉水量供应比两个指标。实际上即使考虑了基于水量平衡框架下的灌溉水利用效率指标体系,以及尺度效应对指标的影响,对不同尺度下的效率指标进行量化依然是一个难点。这些指标中的各类水量要素的数值主要是通过水量平衡观测确定的,对小尺度只需开展田间水量平衡观测,而对于中等尺度、大尺度,则需针对灌区或流域,选择一些大面积典型水量平衡区进行观测,这种观测牵涉的因素较多,观测较困难,有些要素难于直接观测而须借助于数学模拟取得。在大尺度上则需借助遥感技术进行相关水平衡要素的估算<sup>[38]</sup>。正如 Droogers<sup>[39]</sup>指出的随着评价指标研究的发展,已逐渐能够运用一些比较简单的比例来描述水分生产率,与传统灌溉效率相比具有两方面的优势:第一包含了非农业的水资源利用;第二农业用水与其它用水之间的内在关系更清楚。但是正确估算这些指标需要不同尺度下的详细数据(往往很难直接提供),仿真模型及遥感技术的使用有效填补了这种缺陷。

分析 IWMI 提出的灌溉水利用效率指标可见,尽管在不同研究中有着不同的侧重点,但是其指标量化的基础仍是水量平衡模型。只是在不同尺度上得到水量平衡计算要素的方法并不相同,但是明确了尺度效应对节水灌溉评价的影响。而且可以看出以水分生产率为评价指标得到了比较成功的运用。但是有两个重要的问题不得不思索:①尽管水量平衡框架已经比较完整清楚,但许多组成要素实际上难以确定,也难以反映水质的尺度影响、回归水利用的经济问题以及不同区域灌溉的及时性问题等;② IWMI 所提出的 3 类指标是否可以满足节水灌溉评价的需要,它们的适用性和可应用性如何需要进一步探讨。

## 2.5 灌溉水利用效率确定的方法及评价模型

前文已提到,灌溉水利用系数确定的难点在渠系水利用系数,采用的试验方法主要有净水法和动水法。对于全灌区的综合灌溉水利用系数则考虑用各渠道的控制面积或毛灌溉用水量加权求平均。有些学者针对渠道越级取水现象、回归水利用等提出了相应的计算方法。近年来提出的首尾测算分析法等主要从弄清净灌溉用水量与毛灌溉用水量入手,简化了测量工作,适合宏观应用。

由于大尺度、长时间获取有关水平衡要素的困难性,近年来数值模拟技术被应用于各种条件下不同尺度水量平衡要素的模拟以及作物产量的模拟,进行灌溉水利用效率指标的计算和用水管理策略的分析评价。在田间尺度模型方面,ORYZA 2000<sup>[40]</sup>可用来模拟水稻在不同灌溉及施肥措施下的田间水分、养分运移及生长过程和产量。SWAP<sup>[41]</sup>则被广泛应用于旱作水分运移及产量的模拟。

分布式流域水文模型近年来在灌区尺度得到了广泛的应用,其中有代表性的模型有 SWAT。由于 SWAT 模型既可模拟水量转化过程,又可模拟作物产量,因而可用于灌区水平衡要素及作物产量模拟<sup>[42-43]</sup>。MODEFLOW 是不同尺度地面水、地下水相互作用模拟中较好的模型之一。Sophocleous 等<sup>[44]</sup>将 SWAT 模型和 MODEFLOW 结合起来研究灌区水文循环问题;Elhassan<sup>[45]</sup>等将水箱模型修改后用来模拟稻田的水平衡过程,并将其与地下水模型结合,用来模拟水稻种植区地表水、地下水联合应用策略及其对区域浅层地水平衡的影响。IWMI 的研究人员<sup>[39]</sup>将 SWAP 和 SLURP 模型结合起来,模拟灌区的水平衡及作物产量问题,并进行相关指标的计算和用于不同水管理策略的评价。

## 2.6 节水潜力评价指标及方法

目前,国内外对节水潜力的内涵还没有一个公认的、统一的标准,相应地,对于节水潜力的计算也就没有

一致的方法。早期节水潜力的估算都是从单一的节水灌溉技术出发,侧重于单项节水灌溉的节水效果,近年来越来越多的学者认识到从整个区域综合估算节水潜力的重要性,并且认为对灌区的农业需水量分析预测,不仅要考虑工程技术措施,还要注重农业结构调整、抗旱作物引进等非工程和管理措施的影响。

国内有关节水潜力计算的文献很多,总体来看,这些计算节水潜力的方法基本以灌溉水利用系数及田间净灌溉定额为评价标准,根据节水灌溉措施条件下的指标(往往根据有限点上的试验获得)与现状条件下指标之差,估算毛灌溉用水量的差值,进而计算节水潜力。前文已经提到,因为农田水分循环系统中回归水重复利用(可回收水量)的存在,以及各种影响真实节水量的因素具有综合效应,仅仅依据渠道衬砌和田间节水措施等田间试验结果得到的灌溉水利用系数及田间净灌溉定额,通过简单的数学方法来推算灌区尺度的节水潜力及节水量是不合理的,尺度对节水量具有重要影响。

近年来许多学者已认识到传统评价指标的局限性,并提出了一些新的评价指标和节水潜力计算方法。Seckler<sup>[46]</sup>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<sup>[47]</sup>指出计算节水潜力时考虑尺度效应的重要性。李远华等<sup>[29]</sup>及崔远来等<sup>[31]</sup>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<sup>[6]</sup>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。裴源生等<sup>[48]</sup>从区域广义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。沈振荣等<sup>[49]</sup>将真实节水潜力分为“资源型”真实节水潜力和“效率型”真实节水潜力。“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。

虽然真实节水潜力研究已引起学者的重视,但目前对采用哪些指标以及如何进行节水潜力评价,这些指标针对不同类型灌区、不同尺度、不同节水环节的适应性,各类指标之间的关系、影响因素、变化规律等还缺少研究,也没有统一的认识。

### 3 结论及展望

从传统的灌溉效率指标到考虑到尺度效应及回归水利用的新效率指标、再到以水分生产率及“消耗或非消耗”比例类的指标,关于灌溉水利用效率指标、灌溉节水潜力评价方法、水资源调配决策的依据等,无论在国内外都已成为争论的焦点。早期的灌溉效率指标是从水量的角度描述了为满足作物有效性使用而必须供给的灌溉水量,主要适用于灌溉系统设计及灌区(特别是渠系工程)管理水平评价等,国内长期使用的灌溉水利用系数就属于此类。随着对回归水重新利用及节水灌溉尺度效应的认识,许多考虑回归水利用的灌溉水利用效率指标被提出,如有效灌溉效率、净灌溉效率、节水灌溉水资源利用系数等。

目前提出的考虑回归水重复利用类的指标或有关“比例”类的指标,其概念和内涵是比较明晰的,但是因为涉及到不同尺度回归水利用量以及以蒸发蒸腾量为主的各类“消耗”的定量观测及计算的困难,以上指标在目前条件下用于实际灌区的日常水管理还有一定难度。从考虑回归水重复利用类的指标到IWMI所提出的三类代表性指标,以及Perry所建议的指标,试图区分“水分利用”这一术语中所包含的要素,理清尺度对灌溉水利用评价的影响,并且IWMI所提出的指标在多项研究中已经得到成功运用。但IWMI指标体系以水量平衡计算为基础,数据获取较难。基于现有灌溉水利用效率指标,还难以实现灌区真实节水潜力的估算。

因此无论从使用目的还是现实条件来讲,传统的灌溉效率指标是否可以被取代,现在还不能下定论。实际上现阶段还没有一套在任何条件均适用的评价灌溉水利用效率的量化指标。针对不同数据基础、术语表达、环境要求和目标,不同的灌溉水利用效率指标有着各自不同的适用性。但对有关术语进行规范、研究它们之间的相互关联规律、适用条件、影响因素、节水潜力评价的方法等正显得越来越紧迫。

## 参考文献:

- [1] MOLDEN D. Accounting for water use and productivity[M]. Colombo: IWMI, Sri Lanka, 1997:16.
- [2] JENSEN M E. Water conservation and irrigation systems[C] //Proceedings of the Climate Technology Seminar. Colombia:[s. n.], 1977: 208-250.
- [3] KELLER A A, KELLER J. Effective efficiency: A water use efficiency concept for allocating freshwater resources[R]. Winrock International: Water Resources and Irrigation Division, VA, 1995: 19.
- [4] PERRY C J. The IWMI water resources paradigm: definitions and implications[J]. Agricultural Water Management, 1999, 40: 45-50.
- [5] PERRY C J. Efficient irrigation, inefficient communication, flawed recommendations[J]. Irrigation and Drainage, 2007, 56: 367-378.
- [6] 陈伟, 郑连生, 聂建中. 节水灌溉的水资源评价体系[J]. 南水北调与水利科技, 2005, 3(3): 32-34. (CHEN Wei, ZHENG Lian-sheng, NIE Jian-zhong. A new water resources assessment system in water-saving irrigation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2005, 3(3): 32-34. (in Chinese))
- [7] MARINUS G B. Standards for irrigation efficiencies of ICID[J]. J Irrig and Drain Engrg, ASCE, 1979, 105(1): 37-43.
- [8] WOLTERS W. Influences on the efficiency of irrigation water use[M]. The Netherlands: International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI) Publications, 1992: 150.
- [9] 水利部. 农村水利技术术语[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (Ministry of Water Resources. Technical terminology for rural water conservancy[S]. Beijing: China WaterPower Press, 2005. (in Chinese))
- [10] 王会肖, 刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展[J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 99-104. (WANG Hui-xiao, LIU Chang-ming. Advances in crop water use efficiency research[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(1): 99-104. (in Chinese))
- [11] 沈荣开, 杨路华, 王康. 关于以水分生产率作为节水灌溉指标的认识[J]. 中国农村水利水电, 2001(5): 9-11. (SHEN Rong-kai, YANG Lu-hua, WANG Kang. Recognition of taking water productivity as index of water saving irrigation[J]. China Rural Water Resources and Hydropower, 2001(5): 9-11. (in Chinese))
- [12] 蔡守华, 张展羽, 张德强. 修正灌溉水利用效率指标体系的研究[J]. 水利学报, 2004, 35(5): 111-115. (CAI Shou-hua, ZHANG Zhan-yu, ZHANG De-qiang. Modified index system for utilization efficiency of irrigation water[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(5): 111-115. (in Chinese))
- [13] 田娟, 郭宗楼, 姚水萍. 灌区灌溉管理质量指标的综合因子分析[J]. 水科学进展, 2005, 16(2): 284-288. (TIAN Juan, GUO Zong-lou, YAO Shui-ping. Analysis of comprehensive principal factors in irrigation management level index of irrigation area[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(2): 284-288. (in Chinese))
- [14] 王景雷, 吴景社, 齐学斌, 等. 节水灌溉评价研究进展[J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 521-525. (WANG Jing-lei, WU Jing-she, QI Xue-bin, et al. Advances in water saving irrigation evaluation[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(4): 521-525. (in Chinese))
- [15] 蔡甲冰, 刘钰, 雷廷武, 等. 精量灌溉决策定量指标研究现状与进展[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 531-537. (CAI Jia-bing, LIU Yu, LEI Ting-wu, et al. Review of indices for precision irrigation decision-making[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(4): 531-537. (in Chinese))
- [16] HART W E, SKOGERBOE G V, PERI G, et al. Irrigation performance: An evaluation[J]. J Irrig and Drain Engrg, ASCE, 1979, 105(3): 275-288.
- [17] BURT C M, CLEMMENS A J, STRELKOFF T S, et al. Irrigation performance measures: Efficiency and uniformity[J]. J Irrig and Drain Engrg, ASCE, 1997, 123(6): 423-442.
- [18] US Interagency Task Force. Irrigation water use and management[R]. Washington DC: US Gov Printing Office, USA, 1979: 143.
- [19] WILLARDSON L S, ALLEN R G, FREDERIKSEN H, et al. Universal fractions and the elimination of irrigation efficiencies [C] //Paper presented at the 13th Technical Conference of the US Committee on Irrigation and Drainage. Denver: Colorado, 1994: 15.
- [20] KELLER A A, SECKLER DW, KELLER J. Integrated water resource systems: Theory and policy implications[R]. Colombo: IWMI, Sri Lanka, 1996: 14.
- [21] LANKFORD B A. Localising irrigation efficiency [J]. Irrigation and Drainage, 2006, 55: 345-362.
- [22] 高传昌, 张世宝, 刘增进. 灌溉渠系水利用系数的分析与计算[J]. 灌溉排水, 2001, 20(3): 50-54. (GAO Chuan-chang, ZHANG Shi-bao, Liu Zeng-jin. Analysis and calculation of conveyance efficiency of an irrigation canal system[J]. Irrigation and Drainage, 2001, 20



- (3): 50-54. (in Chinese))
- [23] 汪富贵. 大型灌区灌溉水利用系数的分析方法[J]. 武汉水利电力大学学报, 1999, 32(6): 28-31. (WANG Fu-gui. Analytical method of irrigation efficiency of large-size irrigation district[J]. J Wuhan Univ of Hydr & Elec Eng, 1999, 32(6): 28-31. (in Chinese))
- [24] 沈小谊, 黄永茂, 沈逸轩. 灌区水资源利用系数研究[J]. 中国农村水利水电, 2003(1): 21-24. (SHEN Xiao-yi, HUANG Yong-mao, SHEN Yi-xuan. Research on the water use efficiency in irrigation district[J]. China Rural Water Resources and Hydropower, 2003(1): 21-24. (in Chinese))
- [25] 沈逸轩, 黄永茂, 沈小谊. 年灌溉水利用系数的研究[J]. 中国农村水利水电, 2005(7): 7-8. (SHEN Yi-xuan, HUANG Yong-mao, SHEN Xiao-yi. Research on annual irrigation water use efficiency[J]. China Rural Water Resources and Hydropower, 2005(7): 7-8. (in Chinese))
- [26] 谢柳青, 李桂元, 余健来. 南方灌区灌溉水利用系数确定方法研究[J]. 武汉大学学报, 2001, 34(2): 17-19. (XIE Liu-qing, LI Gui-yuan, YU Jian-lai. Research on method of determining irrigation water efficiency of irrigation districts in China's southern region[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2001, 34(2): 17-19. (in Chinese))
- [27] 中国灌溉排水发展中心. 全国现状灌溉水利用系数测算分析报告[R]. 北京: 中国灌溉排水发展中心, 2007: 68. (China Centre for Irrigation and Drainage Development. Research report on measurement of irrigation water use efficiency of China[R]. Beijing: China Centre for Irrigation and Drainage Development, 2007: 68. (in Chinese))
- [28] 沈荣开, 张瑜芳, 杨金忠. 内蒙河套引黄灌区节水改造中推行井渠结合的几个问题[J]. 中国农村水利水电, 2001(2): 16-19. (SHEN Rong-kai, ZHANG Yu-fang, YANG Jin-zhong. Issues of joint utilization of surface and ground water in the reconstruction and rehabilitation of Hetao irrigation district, Inner Mongolia, China[J]. China Rural Water Resources and Hydropower, 2001(2): 16-19. (in Chinese))
- [29] 李远华, 董斌, 崔远来. 尺度效应及其节水灌溉策略[J]. 世界科技研究与发展, 2005, 27(6): 31-35. (LI Yuan-hua, DONG Bin, CUI Yuan-lai. Scale effect and strategy for water saving irrigation[J]. World Sci-Tech R&D, 2005, 27(6): 31-35. (in Chinese))
- [30] 董斌, 崔远来, 李远华. 水稻灌区节水灌溉的尺度效应[J]. 水科学进展, 2005, 16(6): 833-839. (DONG Bin, CUI Yuan-lai, LI Yuan-hua. Scale effect of water saving in rice-based irrigation system[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(6): 833-839. (in Chinese))
- [31] 崔远来, 董斌, 李远华, 等. 农业节水灌溉评价指标与尺度问题. 农业工程学报, 2007, 23(7): 1-7. (CUI Yuan-lai, DONG Bin, LI Yuan-hua, et al. Assessment indicators and scales of water saving in agricultural irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 1-7. (in Chinese))
- [32] 代俊峰, 崔远来. 灌溉水文学及其研究进展[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 294-300. (DAI Jun-feng, CUI Yuan-lai. Progress in study of the irrigation hydrology[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 294-300. (in Chinese))
- [33] GUERRA L C, BHUIYAN S I, TUONG T P, et al. Producing more rice with less water from irrigated systems[R]. Colombo: IWMI, Sri Lanka, 1998: 24.
- [34] ZOEBL D. Is water productivity a useful concept in agricultural water management[J]. Agricultural Water Management, 2006, 84: 265-273.
- [35] MOLDEN D, SAKTHIVADIVEL R, CHRISTOPHER J, et al. Indicators for comparing performance of irrigated agricultural systems[R]. Colombo: IWMI, Sri Lanka, 1998: 29.
- [36] KLOEZEN W H, GARCES R C. Assessing irrigation performance with comparative indicators: The case of the Alto Bio Lerma irrigation district, Mexico[R]. Colombo: IWMI, Sri Lanka, 1998, 39.
- [37] MCCARTNEY M P, LANKFORD B A, MAHOO H. Agricultural water management in a water stressed catchment: Lessons from the RIPARWIN Project[R]. Colombo: IWMI, Sri Lanka, 2007: 46.
- [38] BASTIAANSEN W G M, MOLDEN D, THIRUVENGADACHARI S, et al. Remote sensing and hydrologic models for performance assessment in Sirsa Irrigation Circle, India[R]. Colombo: IWMI, Sri Lanka, 1999: 29.
- [39] DROOGERS P, GEOFF K. Estimating productivity of water at different spatial scales using simulation modeling[R]. Colombo: IWMI, Sri Lanka, 2001: 16.
- [40] BOUMAN B A M, KROPFF M J, WOPPEREIS M C S, et al. ORYZA 2000: Modeling lowland rice[M]. Los Baños: International Rice Research Institute and Wageningen University and Research Centre, 2001: 235.
- [41] DAM V J C, HUYGEN J, WESSELING J G, et al. User's guide of SWAP Version 2.0, simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment[M]. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 1997.
- [42] 胡远安, 程声通, 贾海峰. 非点源模型中的水文模拟: 以 SWAT 模型在芦溪小流域的应用为例[J]. 环境科学研究, 2003, 16



- (5):29-36. (Hu Yuan-an, CHENG Sheng-tong, JIA Hai-feng. Hydrologic simulation in NPS models: Application of SWAT in Luxi watershed [J]. Research of Environmental Science. 2003, 16(5):29-32. (in Chinese))
- [43] 代俊峰. 基于分布式水文模型的灌区水管理研究[D]. 武汉:武汉大学, 2007: 142. (DAI Jun-feng. Water management in irrigated area based on distributed hydrological model[D]. Wuhan: Wuhan University, 2007: 142. (in Chinese))
- [44] SOPHOCLEOUS M, PERKINS P P. Methodology and application of combined watershed and ground-water models in Kansas[J]. Journal of Hydrology, 2000, 236(3/4):185-201.
- [45] ELHASSAN A M, GOTO A, MIZUTANI M. Effect of conjunctive use of water for paddy field irrigation on groundwater budget in an alluvial fan[C] //HUANG Guang-hua, Luis S P. Land and Water Management: Decision Tools and Practices. Beijing: China Agriculture Press, 2004: 20-28.
- [46] SECKLER D. The new era of water resources management: From 'dry' to 'wet' water savings[R]. Colombo: IWMI, Sri Lanka, 1996: 17.
- [47] 茆智. 节水潜力分析要考虑尺度效应[J]. 中国水利, 2005(15):14-15. (MAO Zhi. Scaling effect should be considered in water saving potential analysis[J]. China Water Resources, 2005(15):14-15. (in Chinese))
- [48] 裴源生, 张金萍, 赵勇. 宁夏灌区节水潜力的研究[J]. 水利学报, 2007, 38(2):239-248. (PEI Yuan-sheng, ZHANG Jin-ping, ZHAO Yong. Water saving potential in irrigation area of Ningxia autonomous region[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(2): 239-248. (in Chinese))
- [49] 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: 中国水利电力出版社, 2000: 245. (SHEN Zhen-rong, WANG Lin, YU Fu-liang, et al. New concepts of water saving-study and application of real water saving[M]. Beijing: China Water Power Press, 2000: 245. (in Chinese))

## Advances in assessment indicators of irrigation water use efficiency<sup>\*</sup>

CUI Yuan-lai, XIONG Jia

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The definitions and their utilization about the assessment indicators of the irrigation water use efficiency (IWUE) are reviewed. The disadvantages and their use conditions of the existing IWUE are analyzed. We conclude that no indicators can be used to quantify IWUE in any conditions. Firstly, the connotations of different nomenclature of IWUE are ambiguity, which results in the use interchangeably of various terms regardless of the precise implications of their recommendations. Secondly, some new concepts of assessment framework and indicators are right, but it is difficult to determine the components in the framework, and thus not suitable for the utilization in water management in an irrigation system. Finally, we point out the essentiality of giving the precise implications of the existing IWUEs and their specific use conditions, investigate their relationships and affecting factors, and propose the methodology of evaluating the water saving potential.

**Key words:** irrigation water use efficiency; irrigation efficiency; water productivity; assessment indicator; water saving potential

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50879060; No. 50839002; No. 50579059).