

# 井渠结合灌区用水效率指标尺度效应研究框架

陈皓锐, 黄介生, 伍靖伟, 杨金忠

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

**摘要:** 现有灌溉用水效率尺度效应的研究大部分集中在地表水灌区, 而较少涉及地下水利用灌区, 该文针对井渠结合灌区存在地下水回归利用的实际情况, 以河北省石津灌区为背景, 在国际水管理研究院 (IWMI) 提出的水收支方法的基础上引入回归水利用指标, 提出了在井渠结合灌区进行用水效率指标尺度变化规律研究的工作框架。在所提出的框架中, 评价指标选择 IWMI 体系, 数据获取手段主要为资料收集和试验观测, 尺度划分方式按照现有灌区管理模型分为灌区, 干渠, 分干, 支渠和田间 5 个尺度。研究成果展现了灌溉用水效率尺度效应研究所涉及到的指标选取、尺度划分、水收支解析、水平衡要素数据获取方式、回归水分析 5 个方面的工作过程。该框架对于开展中国北方井渠结合灌区的节水灌溉尺度效应研究有着一定的参考价值 and 借鉴意义。

**关键词:** 灌溉, 地下水, 灌渠, 用水效率, 尺度效应, 水平衡框架

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.08.001

中图分类号: S271

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-8-0001-07

陈皓锐, 黄介生, 伍靖伟, 等. 井渠结合灌区用水效率指标尺度效应研究框架[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 1-7.

Chen Haorui, Huang Jiesheng, Wu Jingwei, et al. Scale effect research framework of irrigation water use efficiency indices in well-canal combined irrigation area[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(8): 1-7.(in Chinese with English abstract)

## 0 引言

由于认识到灌溉用水效率指标依赖于所选择的尺度大小<sup>[1-5]</sup>, 国内外许多学者试图弄清不同尺度用水效率指标的变化规律及其影响因素<sup>[6-11]</sup>, 从而制定正确的节水灌溉策略, 以达到真正节水的目的。但目前关于灌溉用水效率指标及其尺度效应的研究才刚刚起步, 很多关键问题并未得到很好的解决, 如尺度效应产生的原因、基于尺度效应考虑的灌溉用水效率指标的选择、大尺度水平衡要素的获取方式、灌区分布式水文模型的构建、有物理涵义的尺度转换模型的建立等等。而目前关于尺度效应的研究成果主要是集中在丰水区或地表水灌区<sup>[8-9]</sup>, 很少考虑地下水的利用, 因此针对井渠结合灌区存在地下水回归利用这一实际情况进行用水效率及其尺度效应系统化的研究是很有必要的。

本文以河北省石津灌区为研究区, 通过了解灌区提供的资料情况和布置灌区水平衡要素观测试验, 总结了在井渠结合灌区存在地下水回归利用这一实际情况下开展用水效率评价指标尺度变化规律研究的工作框架, 首先引入国际水管理研究院 (IWMI) 水收支方法对各个尺度的水平衡要素进行系统全面的分类并提出适合尺度效应研究的评价指标, 然后根据灌区实际情况概化不同尺度的水分消耗转化过程, 对水平衡要素进行具体解析并提出相应获取方式。该框架对于开展中国节水灌溉尺度

效应研究 (北方地区、井渠结合灌区) 有着一定的参考价值和借鉴意义。

## 1 IWMI 水收支方法及回归水评价指标

### 1.1 水收支方法

1997 年, IWMI 的 Molden 等人提出了一种水收支方法<sup>[12]</sup>, 旨在对不同尺度的水平衡要素进行系统全面的分类, 从而研究各个尺度的水分消耗、转化和利用过程。该框架见图 1。

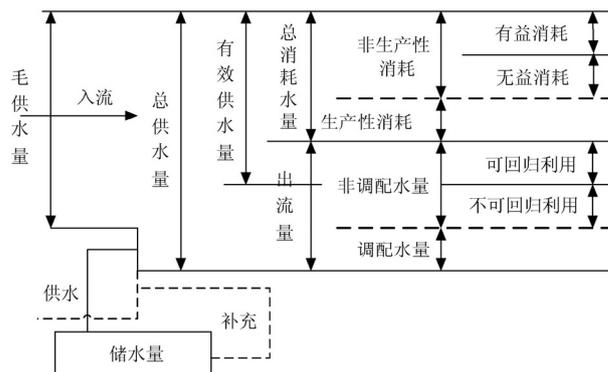


图 1 国际水管理研究院 (IWMI) 水收支方法

Fig.1 Method of water accounting (IWMI)

相关术语如下:

- 1) 毛供水量: 进入研究区的所有水量, 包括降水、地表水和地下水入流。
- 2) 总供水量: 毛供水量加上储水变化量 (包括地表塘堰储水、地下水、土壤水)。
- 3) 总消耗水量: 研究区内的水被使用后或排出后不可再利用或不适宜再利用, 包括非生产性消耗和生产性

收稿日期: 2008-09-02 修订日期: 2008-11-29

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2006CB403406) 资助  
作者简介: 陈皓锐 (1984-), 男, 湖北赤壁人, 博士生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。武汉 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室农水楼, 430072。Email: chr\_1984@yahoo.cn

消耗。消耗有如下 4 类：作物蒸腾和水分蒸发；水流入海洋、沼泽、咸水层等无法再利用的区域；水被污染后无法再利用；合成植物体，形成产量。

4) 出流量：从地表或地下流出研究区域的水量，包括调配水量和非调配水量。

5) 生产性消耗：符合人类供水目的的水的消耗量，流域尺度生产性消耗还包括工业用水、农业用水等多方面；灌区尺度可能只有作物蒸腾。

6) 非生产性消耗：指人们供水特定目的不一致的水分消耗，如水稻田蒸发、旱田表土蒸发等。非生产性消耗进一步包括有益消耗（水分消耗能产生一定的效益，如环境用水）和无益消耗（水分消耗不能产生效益或产生负效益，如涝渍地上水分的蒸发，深层渗漏进入咸水层等）。

7) 调配水：根据水法、水管理部门的配水计划或水权等必须为其他区域分配出来的水量，如河道最小下泄流量。

8) 非调配水量：指出流量扣除调配水后所剩余的水量，这部分水量由于区域内保、蓄水设施不足或运行管理不当而没有被本区域利用，分为可重复利用（由于缺乏相应条件目前没有被本区重复利用，流出本区后若有合适条件能够再次被本区或其他区域重新利用，也可称做回归水量）和不可重复利用（由于保蓄水设施不当而无法被其他区域利用，如下泄的洪水）。

9) 有效供水量：指研究区域内所有可利用的水量，等于总供水量扣除调配水和非调配水中的不可利用部分，或者等于生产性消耗、非生产性消耗和非调配水中的可回归利用水量之和。

## 1.2 相关评价指标

基于 IWMI 提出的水收支方法，整个指标体系可分为如下 3 类指标：

1) 总消耗比例指标 (depleted fraction)：反映的是水资源经过一个区域后被实际消耗的程度。总消耗比例指标主要有两种，分别为总耗水量占总供水量比例指标  $DF_{net}$ 、总耗水量占有效供水量比例指标  $DF_{available}$ ；

2) 水分生产性消耗比例指标 (process fraction)：反映的是水资源在系统中生产性消耗所占的比例。水分生产性消耗比例指标主要有 3 种，分别为生产性消耗占总供水量比例指标  $PF_{net}$ 、生产性消耗占有效供水水量比例指标  $PF_{available}$ 、生产性消耗占总耗水量比例指标  $PF_{depletion}$ ；

3) 水分生产率指标 (water productivity)：反映的是水资源的产出效率。水分生产率指标主要有 5 种，分别为总供水量水分生产率  $WP_{net}$ 、灌溉水分生产率  $WP_I$ 、有效供水量水分生产率  $WP_{available}$ 、总消耗水量水分生产率  $WP_{depletion}$ 、腾发量水分生产率  $WP_{ET}$ 。

## 1.3 灌区回归水分析

在合适的条件下，流出灌区的非调配水量都有被灌区内部或灌区外其他区域重新利用的潜在可能，可称之为理论回归水量。而事实上，在理论回归水量中，可能只有一部分被灌区内部重新利用，这部分水量被称作重

复利用水量。理论回归水量扣除重复利用水量，就是实际回归水量。

引入总供水回归系数、回归有效系数和重复利用系数的概念。总供水回归系数是指实际回归水量与总供水量之比，回归有效系数是指实际回归水量与理论回归水量之比<sup>[8]</sup>，重复利用系数是指重复利用水量与理论回归水量之比

$$NRF = \frac{Q_{RF}}{Q_{net}} \quad (1)$$

$$ERFF = \frac{Q_{RF}}{Q_{CRF}} \quad (2)$$

$$RF = \frac{Q_{CRF} - Q_{RF}}{Q_{CRF}} = 1 - ERFF \quad (3)$$

式中： $NRF$ ——总供水回归系数； $Q_{net}$ ——总供水量； $Q_{RF}$ ——实际回归水量； $Q_{CRF}$ ——理论回归水量； $ERFF$ ——回归有效系数； $RF$ ——重复利用系数。

## 2 研究区水平衡框架解析及数据获取

### 2.1 研究区介绍

石津灌区地处太行山麓、河北省中南部平原，位于东经  $114^{\circ}19' \sim 116^{\circ}30'$ ，北纬  $37^{\circ}30' \sim 38^{\circ}18'$  之间。灌区年平均降水量 488 mm，年平均蒸发量 1 100 mm，属半干旱半湿润地区，主要作物是冬小麦、玉米和棉花。石津灌区设计灌溉面积为  $1.67 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，目前灌溉面积约  $1.30 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，近年计划配水面积约  $8.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。灌区总体示意图见图 2。



图 2 河北省石津灌区示意图

Fig.2 Sketch map of Shijin irrigation scheme in Hebei province, China

选择石津灌区、军齐干渠、曹园分干、北二支和一斗作为各级尺度的研究区。

#### 2.1.1 灌区尺度

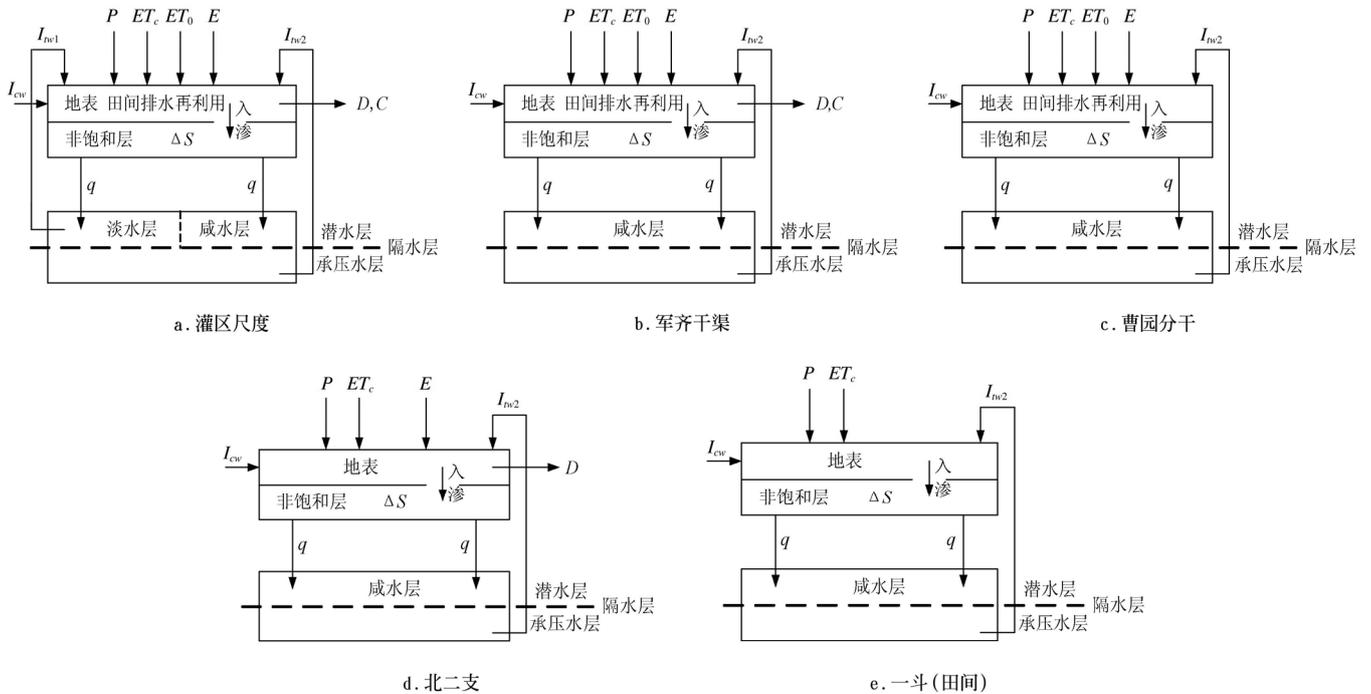
根据《河北省石津灌区节水改造专题报告》，整个灌区分为咸水地下区和淡水地下区，其中军齐干渠灌域皆属于咸水地下水区。

在灌区尺度，水资源通过渠道引水、机井（含深井和浅井）抽水和降雨等途径进入研究区，除去冲污水量后，一部分被作物通过蒸腾消耗，另外一部分通过空地

蒸发、树木花草蒸腾等途径进入大气，余下的水量，包括通过渠道退水流出灌区和渗漏流入地下水层。渗入咸水层的水量，被视作灌区消耗，而渗入淡水层的水量，可能被浅井抽取出来重新利用。在咸水层区域，为补充渠水和降雨的不足，承压水通过诸多的深井抽取用于灌溉。需要说明的是，灌区尺度上广泛的存在着小量的田间排水，但这些排水基本被灌区内部其他田块重新利用。

灌区尺度的水循环示意图见图 3a。

在灌区尺度，可以通过管理局收集到 29 口地下水观测井和 41 个雨量观测点的位置及观测记录、历年机井总数以及各作物生长季节的机井灌溉水量、主要渠道退水量和冲污水量、历年灌区的渠道总引水量、历年各作物的灌溉面积以及作物总产。



注：P——有效降雨； $ET_c$ ——作物腾发量； $ET_0$ ——其他植物腾发量；E——空地蒸发量； $\Delta S$ ——墒情变化量；q——渗漏水量；D——渠道退水量；C——冲污水调配水量； $I_{w1}$ 、 $I_{w2}$ ——浅井和深井抽水量； $I_{cw}$ ——渠道引水量

图 3 石津灌区不同尺度水收支示意图

Fig.3 Water accounting framework at different scales in Shijin irrigation scheme

2.1.2 干渠尺度

军齐干渠灌域处于石津灌区中部，灌区总干以南，由王家井灌溉所管理，计划面积约  $2.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。目前军齐干渠所有资料情况同灌区尺度。

军齐干渠尺度上，入流量和消耗水量类似灌区尺度，只是由于军齐干渠灌域处于地下水咸水层，因而机井抽水量皆是承压水，且渗漏水量由于流入咸水层而被视作消耗水量（图 3b）。

2.1.3 分干尺度

曹园分干位于军齐干渠的中北部，分干渠道长度约为 7 800 m，计划配水面积为 1 700  $\text{hm}^2$ 。曹园分干由王家庄管理站管理，下辖 7 条支渠，20 条干斗。与灌区和军齐干渠已有资料相比，除机井灌溉水量资料之外，其他资料从管理局和下属管理所收集。曹园分干除了没有渠道退水量和冲污调配水量外，其他水循环过程类似军齐干渠（图 3c）。

2.1.4 支渠和田间尺度

由于灌区管理单位只负责分干及分干以上的渠系管理及数据积累，为方便研究，选择曹园分干北二支及北二支的一斗作为支渠尺度和田间尺度试验区，以获取相

关数据。

北二支试验区位于曹园分干，面积为 106.67  $\text{hm}^2$ ，下辖 4 条斗渠。通过 GPS 仪，对北二支试验区进行定位，可得出整个试验区各条渠道的灌溉面积。北二支试验区总体示意图见图 4。

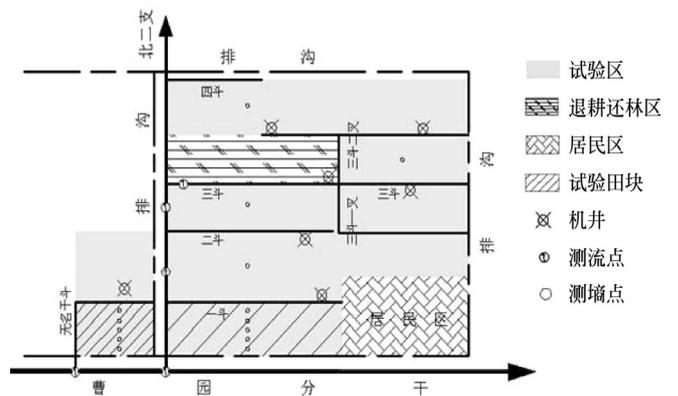


图 4 北二支试验区示意图

Fig.4 Experimental area at North No.2 branch canal scale

在试验区范围内进行如下观测和调查：

1) 渠水入流量和出流量观测: 在北二支渠口及其下属各条斗渠口设置测流设施, 灌溉时量测渠水灌溉量。除此外, 由于三斗末存在排水出流, 因此在三斗末段设置排水量测设施, 观测排水量;

2) 墒情观测: 作物播种前和收割后测量, 墒情观测至 2 m;

3) 地下水位: 在北二支试验区范围及附近选取 3 口地下水观测井, 平时 10 d 观测 1 次, 灌溉和降雨期间 3 d 观测 1 次;

4) 井灌水量调查: 对试验区范围内 6 口机井进行定位, 每季作物收割后根据灌溉水费推求其使用时间, 然后结合抽水试验确定其灌溉水量, 并调查其当季作物实灌面积;

5) 作物产量: 单季作物收割后实地统计支渠和一斗试验区范围内的作物产量;

6) 土地利用: 用 1 m 分辨率的 IKNOS 遥感图片分析获得支渠试验区内土地利用方式, 结合 GPS 定位及实地踏勘予以校正。

北二支与曹园分干相比, 有渠道退水过程, 但没有田间排水再利用过程。由于支渠灌域其他植物覆盖面积较小, 因此其他作物的腾发量可近似忽略(图 3d); 一斗范围土地利用最简单, 可近似视为全作物覆盖条件, 另外, 与北二支相比, 一斗没有渠道退水(图 3e)。

## 2.2 水平衡框架解析

根据石津灌区各个尺度的水分利用和转化特征, 可对 IWMI 水收支方法所涉及的各个水平衡要素进行解析, 见表 1。

表 1 石津灌区不同尺度水平衡要素解析表

Table 1 Analysis of water balance components at different scales in Shijin irrigation scheme

项 目	灌区	军齐干渠	曹园分干	北二支	一斗
<b>A. 总供水</b>					
<b>A.1 毛供水</b>					
A.1.1 降雨量	√	√	√	√	√
A.1.2 渠灌输水	√	√	√	√	√
A.1.3 净地下水利用量	√	√	√	√	√
<b>A.2 墒情变化量</b>					
	√	√	√	√	√
<b>B. 消耗水量</b>					
<b>B.1 生产性消耗</b>					
B.1.1 作物 ET	√	√	√	√	√
<b>B.2 非生产性消耗</b>					
B.2.1 渗漏入咸水层	√	√	√	√	√
B.2.2 空地蒸发	√	√	√	√	无
B.2.3 其他植物腾发	√	√	√	无	无
<b>C. 出流量</b>					
<b>C.1 非调配水量</b>					
C.1.1 可利用渗流出流	√	无	无	无	无
C.1.2 排水出流	无	无	无	√	无
C.1.3 渠道退水	√	√	无	无	无
C.1.4 不可重复利用量	无	无	无	无	无
<b>C.2 调配水量</b>					
C.2.1 生态水量	√	√	无	√	无
C.2.2 外区预留	无	无	无	无	无
<b>D. 产量</b>					
	√	√	√	√	√

## 2.3 数据获取方式

### 1) 土地利用

灌区、军齐干渠、曹园分干可根据遥感图片获取区域土地利用结构。对于田间道路、沟渠等无法观测的观测项目, 按照支渠试验区的利用方式进行分摊<sup>[8]</sup>。北二支、一斗的土地利用方式可利用 IKNOS 遥感图片, 并结合 GPS 对试验区的定位以及实地调查情况进行修正。

### 2) 降雨量

对灌区 41 个雨量观测点进行精确定位, 利用灌区的降雨资料, 根据泰森多边形法计算每一个雨量控制点的雨量, 并根据面积加权平均推求灌区各级尺度平均雨量。

### 3) 渠道输水量

灌区、军齐干渠、曹园分干由灌区提供渠道进口灌溉输水量; 北二支和一斗通过试验区测流设施直接测量。

### 4) 净地下水利用量

首先说明统计井灌水量  $I_{tw}$ 、计算渗漏量  $q^{\downarrow}$ 、净渗漏量  $q_{nr}$ 、净地下水利用量  $I_{ngw}$  的含义, 见图 5。统计井灌水量是指直接从灌区管理单位获取的机井灌溉水量资料, 根据研究需要, 可将其分为深井和浅井份别统计; 计算渗漏量是指通过土壤垂直排入地下水的水量, 由于流入咸水层的渗漏量被视作消耗水量而非出流量, 因此计算渗漏量只针对指淡水区; 净渗漏量是指计算渗漏水量减去毛管上升补给后的水量, 是土壤非饱和层和地下水层通过土壤介质的垂向净交换量; 净地下水利用量是指土壤非饱和层和地下水层在垂直方向上的净交换量, 是净渗漏量与统计井灌水量共同作用的结果。它们之间的关系如式(4)、式(5)<sup>[13]</sup>。

$$q_{nr} = q^{\downarrow} - q^{\uparrow} \quad (4)$$

$$I_{ngw} = \max\{I_{tw} - q_{nr}, 0\} = \{I_{tw1} + I_{tw2} - q_{nr}, 0\} \quad (5)$$

式中  $q^{\uparrow}$ ——毛管上升补给水量。

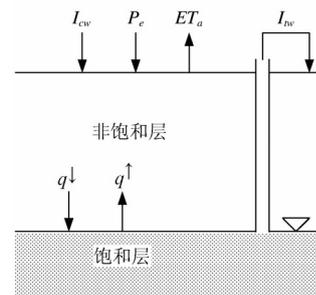


图 5 井渠结合灌区净地下水利用分析  
Fig.5 Analysis of net groundwater utilization in well-canal combined irrigation area

在计算灌区净地下水利用量, 首先根据调查将灌区分为咸水层区域和淡水层区域, 分别计算其净地下水利用量, 然后汇总。

咸水层渗漏入地下水的水量皆属于消耗水量, 不在此项中考虑, 故计算渗漏量  $q^{\downarrow}=0$ ;

灌区的地下水位一般在 10 m 左右, 因此毛管上升补给水量  $q^{\uparrow}=0$ ; 故咸水区净渗漏量  $q_{nr} = q^{\downarrow} - q^{\uparrow} = 0$ 。

咸水层无浅井, 故其净地下水利用量

$$I_{ngw} = \max\{I_{nw} - q_{nr}, 0\} = I_{nw2}。$$

淡水层计算渗漏水量分为渠系渗漏和田间渗漏分别计算，其中渠系计算渗漏水量按如下公式计算

$$q_{渠}^{\downarrow} = (1 - m) \times Q_d \quad (6)$$

式中： $m$ ——渠系水利用系数； $Q_d$ ——渠首引水量。

田间计算渗漏量按如下计算<sup>[14]</sup>

$$h(\theta) = \frac{h_b}{\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{1/\lambda}} \quad (7)$$

$$K(\theta) = Ke^{-\alpha/h(\theta)} \quad (8)$$

$$s = \frac{(h(\theta) - h)K(\theta)}{T} \quad (9)$$

$$q_{田}^{\downarrow} = s \times t \times A \quad (10)$$

式中： $h(\theta)$ ——负压水头，mm； $h_b$ ——进气压力值，mm； $\theta_r$ ——剩余含水率； $\theta_s$ ——饱和含水率； $\lambda$ ——大于零的正常数，无因此，反映土壤空隙大小分布； $K$ ——饱和垂直水力传导度，mm/d； $\alpha$ ——与土壤质地有关的经验常数，无因此； $s$ ——渗漏量，mm/d； $t$ ——产生渗漏的时间，d； $A$ ——淡水区灌溉面积。式(7)为 Brooks 和 Corey 提出的土壤水分特征曲线；式(8)为 Rijtema 提出的计算非饱和土壤水力传导度经验公式；式(9)为达西公式。

灌区的地下水位一般在 10 m 左右，因此毛管上升补给水量  $q^{\uparrow} = 0$ ；故淡水层净渗漏量  $q_{nr} = q^{\downarrow} - q^{\uparrow} = q^{\downarrow}$ 。

淡水层无深井，故其净地下水利用量

$$I_{ngw} = \max\{I_{nw} - q_{nr}, 0\} = \max\{I_{nw1} - q^{\downarrow}, 0\}。$$

整个灌区的净地下水利用量为

$$I_{ngw} = I_{nw2} + \max\{I_{nw1} - q^{\downarrow}, 0\}。$$

式中，深井和浅井统计水量可由灌区提供，计算渗漏量  $q^{\downarrow}$  在调查分析土壤相关理化参数的基础上根据式(6)~(10)计算。

军齐干渠、曹园分干、北二支和一斗由于处于灌区咸水层区域，因此其净地下水利用量即为本区深井统计井灌水量  $I_{nw}$ 。其中军齐干渠的  $I_{nw}$  由灌区提供数据；曹园分干、北二支和一斗的  $I_{nw}$  按下述方法计算<sup>[13]</sup>：

$$I_{nw} = U_F N_{nw} Q_{nw} \quad (11)$$

式中： $U_F$ ——机井抽水时间占一天总时间的比例，可在作物收割后根据调查机井电费推求平均抽水时间求得； $N_{nw}$ ——曹园分干内机井数量； $Q_{nw}$ ——机井平均日抽水功率，可由抽水试验获取。

### 5) 墒情变化

灌区、军齐干渠、曹园分干利用 RS 监测土壤含水率<sup>[15]</sup>；北二支渠、一斗在试验区实测收割前后的土壤墒情直接计算。

### 6) 作物腾发量

灌区、军齐干渠、曹园分干利用 SEBAL 模型结合灌

区气象资料和合适的遥感图片（如 NOAA-AVHRR、Landsat7 等）计算，具体方法参考文献[16]；北二支和一斗利用 Penman-Monteith 公式结合气象资料以及土地利用方式计算。

### 7) 渗漏入咸水层

各级尺度依据分区结果，按照式(6)~(10)计算灌区咸水层区域的渗漏量即为该项。

### 8) 空地蒸发

一斗区域内基本被作物覆盖，空地蒸发可忽略；其他尺度根据土地利用分析结果，得出空地面积，按照水面蒸发折算得空地蒸发。

### 9) 其他植物 ET

一斗、北二支区域内作物以作物为主，其他作物或树木 ET 可近似为 0；其他尺度计算方法同作物 ET。

### 10) 可利用渗漏出流

灌区尺度上依据分区结果，按照式(6)~(10)得到灌区淡水层区域的计算渗漏水量  $q^{\downarrow}$ ，则灌区尺度可利用渗漏出流为  $\max\{q^{\downarrow} - I_{nw1}, 0\}$ ；一斗、北二支、曹园分干、军齐干渠皆属于咸水地下水层，其渗漏量被视作为消耗水量，故可利用渗漏出流量为 0。

### 11) 田间排水出流

灌区、军齐干渠、曹园分干上田间排水广泛小量的存在，但流出所灌田块后基本被本尺度范围的其它区域所重新利用，故排水出流量为 0；北二支区域的 3 斗末有排水出流，通过在 3 斗末段修建量水设施，量测排水量即为该尺度的田间排水出流量；一斗无田间排水出流。

### 12) 渠道退水

灌区、军齐干渠末端有退水量，由灌区提供数据；曹园分干末无渠道退水；北二支区域内通过在 3 斗末段修建量水设施，量测渠道退水；一斗无渠道退水。

### 13) 生态水量

灌区、军齐干渠的生态水量主要指渠道冲污水量，由灌区提供数据；曹园分干无生态水量；北二支区域的生态水量主要指退耕还林区的灌溉水量，可根据试验区实际测量；一斗范围内无生态水量。

### 14) 产量

灌区尺度、军齐干渠、曹园分干根据现有二手资料可以获取小麦、玉米和棉花的总产或者由遥感图片绘制作物群体生长图，结合遥感土地利用图片计算产量。北二支渠、一斗产量数据通过试验区实地统计获得。

## 3 回归水分析

灌区尺度上，可能潜在的出流有渠道的退水、田间排水、淡水区计算渗漏量  $q^{\downarrow}$ ，实际出流的有渠道的退水和可利用渗漏出流，田间排水和部分（或全部）计算渗漏出流被重新利用。军齐干渠和北二支处于灌区咸水层区域，因此其渗漏量被视作为消耗，故可能潜在的出流只有渠道退水量和田间排水；曹园分干没有渠道退水量，只有田间排水为理论回归水量。一斗由于既没有渠道退水，也没有田间排水，田间深层渗漏也属于消耗水量不

被考虑, 因此一斗不存在回归水分析。不同尺度的回归水分析见表 2。

表 2 石津灌区不同尺度回归水分析  
Table 2 Analysis of return water at different scales in Shijin irrigation scheme

项 目	灌区	干渠	分干	支渠
理论回归水量	渠道退水 田间排水 淡水区计算渗漏量 $q^{\downarrow}$	渠道退水 田间排水	田间排水	渠道退水 田间排水
重复利用水量	田间排水 $\min\{\text{淡水区计算渗漏量 } q^{\downarrow}, I_{\text{rwl}}\}$	田间排水	田间排水	田间排水
实际回归水量	渠道退水 $\max\{\text{淡水区计算渗漏量 } q^{\downarrow} - I_{\text{rwl}}, 0\}$	渠道退水	0	渠道退水
总供水回归系数	$\frac{\text{渠道退水} + \max\{q^{\downarrow} - I_{\text{rwl}}, 0\}}{\text{渠灌水量} + \max\{I_{\text{rwl}} - q^{\downarrow}, 0\} + \text{降雨} + \Delta S}$	$\frac{\text{渠道退水}}{\text{渠灌水量} + I_{\text{rw2}} + \text{降雨} + \Delta S}$	0	$\frac{\text{渠道退水}}{\text{渠灌水量} + I_{\text{rw2}} + \text{降雨} + \Delta S}$
回归有效系数	$\frac{\text{渠道退水} + \max\{q^{\downarrow} - I_{\text{rwl}}, 0\}}{\text{渠道退水} + \text{田间排水} + q^{\downarrow}}$	$\frac{\text{渠道退水}}{\text{渠道退水} + \text{田间排水}}$	0	$\frac{\text{渠道退水}}{\text{渠道退水} + \text{田间排水}}$
重复利用系数	$\frac{\text{田间排水} + \min\{q^{\downarrow}, I_{\text{rwl}}\}}{\text{渠道退水} + \text{田间排水} + q^{\downarrow}}$	$\frac{\text{田间排水}}{\text{渠道退水} + \text{田间排水}}$	1	$\frac{\text{田间排水}}{\text{渠道退水} + \text{田间排水}}$

#### 4 结 论

在 IWMI 水收支方法基础上, 引入回归水评价指标, 针对井渠结合灌区中存在地下水利用的实际情况, 概化灌区不同尺度水循环过程, 从而具体分析了地下水回归利用情况下 IWMI 水收支方法中各水平衡要素, 并介绍了各水平衡要素的获取方式。文章系统地提出了以 IWMI 水收支方法为基础的、考虑地下水回归利用的井渠结合灌区用水效率指标尺度效应系统化研究的工作框架, 可资同类研究参考借鉴之用。

用水效率指标的尺度变化规律研究通常有模型模拟和田间观测两种研究方法, 本文所提出的工作框架, 不管是通过试验区观测, 还是通过遥感影像破译获取, 都属于田间观测方法的范畴, 该框架在下列 4 种情况下, 存在着较好的实用性:

- 1) 考虑灌区下垫面情况和地下水运动的灌区大尺度分布式模型的构建还不够成熟时, 或用现有分布式模型模拟结果与灌区实际情况相差较大时;
- 2) 研究者所占有的资料不足以支撑相关模拟模型的运行时;
- 3) 小尺度的水分转化和消耗过程较为简单时;
- 4) 不需要进行后续的评价指标尺度转换模型构建研究, 而只需要在一定精度条件下呈现出不同尺度的评价指标变化规律时。

#### 【参 考 文 献】

- [1] 康绍忠, 胡笑涛, 蔡焕杰, 等. 现代农业与生态节水的理论创新及研究重点[J]. 水利学报, 2004, 35(12): 1-7. Kang Shaozhong, Hu Xiaotao, Cai Huanjie, et al. New ideas and development tendency of theory for water saving in modern agriculture and ecology[J]. Journal of Hydrology Engineering, 2004, 35(12): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [2] Molden D, Murray-Rust H, Sakthivadivel R, et al. A Water-Productivity Framework for Understanding and Action[M]//Kijine W J, Barker R, Molden D. Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement. Wallingford: CABI Publishing, 2003: 1-18.
- [3] 崔远来, 董斌, 李远华, 等. 农业灌溉节水评价指标与尺度问题[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 5-7. Cui Yuanlai, Dong Bin, Li Yuanhua, et al. Assessment indicators and scales of water saving in agricultural irrigation [J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(7): 5-7. (in Chinese with English abstract)
- [4] 许迪. 灌溉水文学尺度转换问题研究综述[J]. 水利学报, 2006, 37(2): 141-149. Xu Di. Review on scaling study in irrigation hydrology[J]. Journal of Hydrology Engineering, 2006, 37(2): 141-149. in Chinese with English abstract)
- [5] 茆智. 发展节水灌溉应注意的几个原则性技术问题[J]. 中国农村水利水电, 2003, (3): 19-22. Mao Zhi. Several technological problems in the development of water-saving irrigation[J]. Chinese Rural Hydrology and Hydropower, 2003, (3): 19-22. (in Chinese with English abstract)
- [6] Masoud Parsinejad, Mohammad Reza Yazdani, Hamed Ebrahimian. Field and regional scale evaluation of irrigation efficiency in paddy fields case study: Guilan, Iran[J]. Irrig and Drain, 2009, 58(2): 147-156.
- [7] Droogers P Kite G. Simulation modeling at different scales to evaluate the productivity of water[J]. Phys Chem Earth, 2001, 26(11): 877-880.
- [8] 董斌. 水稻节水灌溉尺度效应研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2002.

- Dong Bin. Study on the Scale Effect of Water Saving Irrigation for Rice[D]. Wuhan: Wuhan University, 2002. (in Chinese with English abstract)
- [9] 崔远来, 董斌, 李远华. 水分生产率指标随空间尺度变化规律[J]. 水利学报, 2006, 37(1): 45—51.  
Cui Yuanlai, Dong Bin, Li Yuanhua. Variation of water productivity in different spatial scales[J]. Journal of Hydrology Engineering, 2006, 37(1): 45—51. (in Chinese with English abstract)
- [10] Singh R, Dam J C, Feddes R A. Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district, India[J]. Agricultural Water Management, 2006, 82: 253—278.
- [11] Ludwig R, Probeck M, Mauser W. Mesoscale water balance modeling in the Upper Danube watershed using sub-scale land cover information derived from NOAA-AVHRR imagery and GIS-techniques[J]. Phys Chem Earth, 2003, 28: 1351—1364.
- [12] Molden D. Accounting for water use and productivity[R]. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute, 1997.
- [13] Bastiaanssen G M, Feddes R A. A new technique to estimate net groundwater use across large irrigated areas by combining remote sensing and water balance approaches, Rechna Doab, Pakistan[J]. Hydrogeology Journal, 2005, 13: 653—664.
- [14] 罗玉锋. 灌区水量平衡模型及其应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2006.  
Luo Yufeng. Water Balance Models of Irrigation System and Their Applications[D]. Wuhan: Wuhan University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张灿龙, 倪绍祥, 刘振波, 等. 遥感监测土壤含水量方法综述[J]. 农机化研究, 2006, (6): 58—61.  
Zhang Canlong, Ni Shaoxiang, Liu Zhenbo, et al. Review on methods of monitoring soil moisture based on remote sensing [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006, (6): 58—61. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李红军, 雷玉平, 郑力, 等. SEBAL 模型及其在区域蒸散研究中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(3): 321—325.  
Li Hongjun, Lei Yuping, Zheng Li, et al. SEBAL model and its application in the study of regional evapotranspiration[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2005, 20(3): 321—325. (in Chinese with English abstract)

## Scale effect research framework of irrigation water use efficiency indices in well-canal combined irrigation area

Chen Haorui, Huang Jiesheng, Wu Jingwei, Yang Jinzhong

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

**Abstract:** The current research of scale effect of irrigation water use efficiency was mainly focused at irrigation schemes with surface water resources, and less involved with groundwater irrigation. Based on the water accounting method developed by International Water Management Institute (IWMI), a general framework for analyzing variability of irrigation water use efficiency indices across scales in well-canal combined irrigation were proposed with return water utilization index, taking Shijin irrigation scheme in Hebei province as an example. In the framework, assessment indices developed by IWMI were explored to access irrigation water use efficiency, and five scales, namely irrigation scheme, main canal, branch main canal, branch canal and field scale, were selected according to the management mode of most irrigation areas in China. Data required for water accounting at those scales were mainly obtained from Shijing irrigation area scheme management agency as well as observation experimentation. Generally speaking, five key aspects of scale effect research of irrigation water use efficiency assessment indices, including assessment indices selection, scale division, water accounting, data collection and return water analyzing, were presented in the research, which could provide some references and experiences to the study on the scale effect of water saving in well-canal combined irrigation area in North China.

**Key words:** irrigation, groundwater, irrigation canals, water use efficiency, water accounting framework