

DOI: CNKI: 32. 1309. P. 20110911. 1132. 007

基于水量平衡的农业节水潜力计算新方法

刘路广, 崔远来, 王建鹏

(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: 农业节水潜力是进行节水改造方案评估、用水效率评价及水资源优化配置的重要依据。在回顾和总结农业节水潜力评价指标和计算方法的基础上, 综合考虑取水、耗水和回归水3个方面, 提出了农业理论节水潜力的概念, 并利用水量平衡原理对相应计算方法进行了推导。同时根据不同的节水措施, 提出了农业耗水理论节水潜力、农业回归水理论节水潜力和农业取水理论节水潜力的概念及计算方法。基于新方法对柳园口灌区农业理论节水潜力进行了计算, 结果表明柳园口灌区农业理论节水潜力为4 636.59万 m^3 ; 其中, 农业耗水理论节水潜力最大, 农业取水理论节水潜力次之, 农业回归水理论节水潜力最小。相关结论为该灌区制定合理的节水灌溉措施和水资源高效利用策略提供了理论依据。

关键词: 节水潜力; 取水; 耗水; 回归水; 水量平衡; 水资源

中图分类号: S274

文献标志码: A

文章编号: 1001-6791(2011)05-0696-07

农业节水潜力的准确估算有利于认清水资源情势, 明晰区域农业节水的重点, 选取切合实际的管理体制和节水技术, 实现水资源高效利用, 促进区域水资源和社会经济的可持续发展。当前, 国内外对农业节水潜力(以下简称节水潜力)的内涵仍没有一个公认的标准, 对节水潜力的评价和计算也没有一致的方法^[1-4]。传统节水潜力主要是指某单个部门、行业(或作物)、局部地区在采取一种或多种综合节水措施后, 与未采取节水措施相比, 所需水量(或取水量)的减少量。因此, 传统的节水潜力主要来自两个方面: ①减少田间净灌溉定额; ②提高灌溉水利用系数。近年来有些学者指出并不是所有取用水的节约量都是节水量, 只有减少的不可回收水量才属于真实意义上的节水量^[5-6]。传统节水潜力的计算忽视了回归水的重复利用。为了克服传统节水潜力评价计算的局限性, 有必要对真实节水潜力进行研究。一方面, 一些学者从水资源消耗(作物需水)角度进行研究, 提出了耗水节水潜力的概念和计算方法。如裴源生^[1]认为耗水节水潜力是在考虑各种可能节水措施的情景下的耗水与不采取节水措施的耗水差值。段爱旺^[4]根据农业节水实现的途径定义了狭义节水潜力和广义节水潜力。傅国斌等^[7]从作物需水量出发, 将某一基准年的实际灌溉用水量和非充分灌溉条件下灌溉需水量的差值作为理论节水潜力。为了克服获取大范围作物蒸发蒸腾量(即作物需水量, 用 ET 表示)和作物产量这一难点, 彭致功等^[8]利用遥感 ET 和遥感作物产量数据构建了区域作物水分生产函数, 确定了主要作物 ET 定额, 计算了耗水节水潜力。另一方面, 一些学者从回归水重复利用角度计算节水潜力, 并分析其尺度效应。由于农田水分循环系统中回归水重复利用的存在, 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全面的, 具有局限性, 尺度对节水量具有重要的影响^[9-12]。Davenport和Hagan^[5]对灌溉取水节水量中的可回收水与不可回收水的概念作了比较系统的说明, 并对美国加州真正意义上的灌溉节水潜力进行了系统分析。李远华等^[13]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, 主要是因为输配水环节损失的水量

收稿日期: 2010-11-01; **网络出版时间:** 2011-09-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20110911.1132.007.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50879060); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090141110024)

作者简介: 刘路广(1984-), 男, 山东德州人, 博士研究生, 从事节水灌溉与水资源管理研究。

E-mail: wlhlg814704@gmail.com

在灌区内部被小型塘堰、水库以及排水沟收集并重新利用。崔远来^[14]提出了净节水量的概念,认为传统方法计算出来的节水潜力为毛节水量,减去节水措施前后回归水利用量的差值后才是净节水量。

本文在总结前人成果的基础上,从取水、耗水和回归水3个方面综合考虑,提出了农业理论节水潜力的概念及其计算方法,并且根据不同的节水措施,提出了农业耗水理论节水潜力、农业回归水理论节水潜力和农业取水理论节水潜力的概念及计算方法。以柳园口灌区为例,利用新方法对农业节水潜力进行了计算分析,以期对灌区水资源高效利用及制定节水灌溉发展策略提供依据。

1 农业理论节水潜力计算新方法

本文认为真实节水潜力应该包括区域不可回收水量和回归水中没有被利用的水量两部分。对于回归水重复利用率高的区域,由于回归水中未重复利用水量很小,因此用耗水节水量作为真实节水潜力是可行的;但是对于回归水重复利用率较低的区域,耗水节水潜力只是真实节水潜力的一部分,并不能完全代替真实节水潜力。节水潜力的计算必须从取水、耗水和回归水3个方面综合考虑,才能真实地认识区域农业用水状况,指导农业节水措施的实施。基于这种考虑,本文提出农业理论节水潜力的概念,并对其计算方法进行了推导。

1.1 公式推导及内涵

1.1.1 理论净灌溉需水量

将作物土壤层作为研究对象,建立土壤水量平衡概念模型,见图1。本文考虑了各种可能出现的水量要素,建立水量平衡方程:

$$\Delta W_{\text{土壤}} = (P - R_p - S_p) + (I_{\text{gross}} - R_l - S_l) + (R'_p + S'_p) + (R'_l + S'_l) + G_p - ET_e - L_s + W_{\text{in}} \quad (1)$$

式中 $\Delta W_{\text{土壤}}$ 为土壤含水量的变化量; P 为冠层截流后到达地面的降水; R_p 为降水产生的地表径流; S_p 为降水产生的深层渗漏; I_{gross} 为理论毛灌溉需水量; R_l 为灌溉产生的地表径流; S_l 为灌溉产生的深层渗漏; R'_p 和 S'_p 分别为降水产生的地表径流和深层渗漏的重复利用量; R'_l 和 S'_l 分别为灌溉产生的地表径流和深层渗漏的重复利用量; G_R 为地下水补给(不包括灌溉和降雨渗入地下水的水量对土壤的补给); ET_e 为作物经济蒸发蒸腾量; L_s 为土壤水侧向流出研究区域的水量。 W_{in} 为其它入流项,例如从研究区域外进入研究区土壤层的引水量或入流量等。

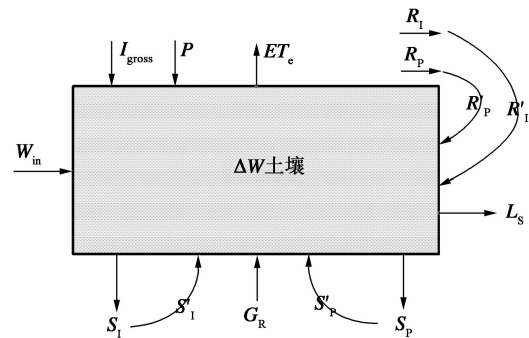


图1 土壤水量平衡概念模型

Fig. 1 Conceptual model of soil water balance

对式(1)进行变换得

$$ET_e + L_s + \Delta W_{\text{土壤}} - (P - R_p - S_p) - (R'_p + S'_p) - G_R - W_{\text{in}} = (I_{\text{gross}} - R_l - S_l) + (R'_l + S'_l) \quad (2)$$

由式(2)可见,等式的右边是灌溉有效供水量,反过来讲,等式的左边是净灌溉需水量,记为理论净灌溉需水量 I_{net} 。假设降雨回归水重复利用量为传统的降水损失乘以降雨回归水利用系数 β_p ,记为: $(R'_p + S'_p) = (R_p + S_p)\beta_p$ 。则理论净灌溉需水量为

$$\begin{aligned} I_{\text{net}} &= ET_e + L_s + \Delta W_{\text{土壤}} - (P - R_p - S_p) - (R'_p + S'_p) - G_R - W_{\text{in}} \\ &= ET_e + L_s + \Delta W_{\text{土壤}} - (P - R_p - S_p) - (R_p + S_p)\beta_p - G_R - W_{\text{in}} \\ &= ET\beta_{ET} + L_s + \Delta W_{\text{土壤}} - P_e - (P - P_e)\beta_p - G_R - W_{\text{in}} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 ET 为作物潜在蒸发蒸腾量; β_{ET} 为作物经济需水系数,即作物经济蒸发蒸腾量与作物潜在蒸发蒸腾量的比值; P_e 为有效降雨量。当计算时段为年时,土壤含水量的变化 $\Delta W_{\text{土壤}}$ 很小,可以忽略;土壤层水分运动以为垂向运动为主,因此土壤水侧向流出量 L_s 一般较小,也可以忽略。则理论净灌溉需水量简化为

$$I_{\text{net}} = ET\beta_{ET} - P_e - (P - P_e)\beta_p - G_R - W_{\text{in}} \quad (4)$$

1.1.2 理论毛灌溉需水量

假设灌溉回归水重复利用量为传统的灌溉损失乘以灌溉回归水利用系数 β_1 , 记为 $(R'_1 + S'_1) = (R_1 + S_1)\beta_1$, 则

$$I_{\text{net}} = (I_{\text{gross}} - R_1 - S_1) + (R'_1 + S'_1) = (I_{\text{gross}} - I_{\text{loss}}) + I_{\text{loss}}\beta_1 \quad (5)$$

式中 I_{gross} 为理论毛灌溉需水量; I_{loss} 为灌溉损失水量。由于 $I_{\text{loss}} = I_{\text{gross}}(1 - \eta_1)$, 其中 η_1 为灌溉水利用系数。联合式(5)得

$$I_{\text{net}} = (I_{\text{gross}} - I_{\text{gross}}(1 - \eta_1)) + I_{\text{gross}}(1 - \eta_1)\beta_1 \quad (6)$$

将式(6)进一步简化得

$$I_{\text{gross}} = \frac{I_{\text{net}}}{\beta_1(1 - \eta_1) + \eta_1} \quad (7)$$

式(7)也可以变换为

$$I_{\text{gross}} = \frac{I_{\text{net}}}{\beta_1 + \eta_1(1 - \beta_1)} \quad (8)$$

1.1.3 农业理论节水潜力的定义

理论毛灌溉需水量不是传统上的毛灌溉需水量, 它考虑了作物经济蒸发蒸腾量、降水和灌溉回归水的重复利用。减少理论毛灌溉需水量属于真实节水的范畴, 因此实现节水必须从以下方面考虑:

(1) 减少 β_{ET} 进行充分灌溉时, $\beta_{ET} = 1$; 实施合理的非充分灌溉时, 可在保持作物高产的同时减少作物蒸发蒸腾量, 从而减少 β_{ET} 。

(2) 增加 β_p 通过各种措施提高降雨损失的重复利用率, 即增加降雨回归水利用系数 β_p 。

(3) 增加 β_1 由式(7)可知, 通过节水措施减少灌溉水的无效损失, 提高灌溉损失水量的重复利用率, 可以到达节水目的。但节水潜力的大小会受到灌溉水利用系数的影响, 当灌溉水利用系数很高时, 传统的灌溉损失本来很少, 未被利用的灌溉回归水就更少, 因此节水空间很小。当灌溉水利用系数较低时, 则采用该方法节水空间较大。

(4) 增加 η_1 由式(8)可知, 通过渠系防渗及管理等措施, 提高灌溉水利用系数可以节水。该系数同样也受灌溉回归水利用系数 β_1 的影响。当 β_1 接近或等于 1 时, 灌溉损失水量基本被重复利用, 通过提高 η_1 节水效果较差或不能节水; 只有当 β_1 较小时, 增加 η_1 节水效果才比较明显。

通过分析可知, 理论毛灌溉需水量综合考虑了多种因素, 它是理论意义上的真实需水量。通过节水措施实现理论毛灌溉需水量的减少量是理论意义上的真实节水潜力, 这里称为农业理论节水潜力。具体的含义为: 农业理论节水潜力是一定水平年、一定区域范围内, 在保证作物产量的基础上, 综合实施各种节水措施前后理论毛灌溉需水量的差值。它是多种因素共同作用的结果, 反映了灌区真实节水潜力, 是灌区水资源管理及实施节水措施必要性的依据。通过减少作物蒸发蒸腾量(减少 β_{ET})得到的节水量称为农业耗水理论节水潜力。同理, 从提高回归水重复利用和灌溉水利用系数角度得到的节水量分别称为农业回归水理论节水潜力和农业取水理论节水潜力。它们反映了不同节水措施实施后节水空间的大小, 是各种节水措施节水潜力大小及节水改造实施的重要依据。农业理论节水潜力是这 3 种节水潜力综合作用的结果, 但不能简单相加。

1.1.4 农业理论节水潜力计算公式

实施节水措施后的理论毛灌溉需水量计算

$$I'_{\text{net}} = ET\beta'_{ET} - P_e - (P - P_e)\beta'_p - G_R - W_{\text{in}} \quad (9)$$

$$I'_{\text{gross}} = \frac{I'_{\text{net}}}{\beta'_1 + \eta'_1(1 - \beta'_1)} \quad (10)$$

式中 I'_{net} 和 I'_{gross} 为实施节水措施后的理论净灌溉需水量和理论毛灌溉需水量; β'_{ET} 、 β'_p 、 β'_1 和 η'_1 分别为实施节水措施后的作物经济需水系数、降雨回归水利用系数、灌溉回归水利用系数和灌溉水利用系数。

则农业理论节水潜力 ΔW 为

$$\Delta W = I_{\text{gross}} - I'_{\text{gross}} \quad (11)$$

1.1.5 不同措施下的农业理论节水潜力

(1) 农业耗水理论节水潜力

$$I'_{\text{net},ET} = ET\beta'_{ET} - P_e - (P - P_e)\beta_p - G_R - W_{\text{in}} \quad (12)$$

$$I'_{\text{gross},ET} = \frac{I'_{\text{net},ET}}{\beta_1 + \eta_1(1 - \beta_1)} \quad (13)$$

$$\Delta W_{ET} = I_{\text{gross}} - I'_{\text{gross},ET} \quad (14)$$

式中 $I'_{\text{net},ET}$ 和 $I'_{\text{gross},ET}$ 分别为只改变 β_{ET} 后的理论净灌溉需水量和理论毛灌溉需水量; ΔW_{ET} 为农业耗水理论节水潜力。

(2) 农业回归水理论节水潜力

$$I'_{\text{net},\text{return}} = ET\beta_{ET} - P_e - (P - P_e)\beta'_p - G_R - W_{\text{in}} \quad (15)$$

$$I'_{\text{gross},\text{return}} = \frac{I'_{\text{net},\text{return}}}{\beta'_1 + \eta_1(1 - \beta'_1)} \quad (16)$$

$$\Delta W_{\text{return}} = I_{\text{gross}} - I'_{\text{gross},\text{return}} \quad (17)$$

式中 $I'_{\text{net},\text{return}}$ 和 $I'_{\text{gross},\text{return}}$ 分别为只改变回归水利用系数后的理论净灌溉需水量和理论毛灌溉需水量; ΔW_{return} 为农业回归水理论节水潜力。

(3) 农业取水理论节水潜力

$$I'_{\text{net},\text{tran}} = ET\beta_{ET} - P_e - (P - P_e)\beta_p - G_R - W_{\text{in}} \quad (18)$$

$$I'_{\text{gross},\text{tran}} = \frac{I'_{\text{net},\text{tran}}}{\beta_1 + \eta'_1(1 - \beta_1)} \quad (19)$$

$$\Delta W_{\text{tran}} = I_{\text{gross}} - I'_{\text{gross},\text{tran}} \quad (20)$$

式中 $I'_{\text{net},\text{tran}}$ 和 $I'_{\text{gross},\text{tran}}$ 分别为只改变灌溉水利用系数后的理论净灌溉需水量和理论毛灌溉需水量; ΔW_{tran} 为农业取水理论节水潜力。

1.2 模型参数

农业理论节水潜力不仅仅从减少水资源实际消耗量角度来计算节水潜力,由于公式中的作物经济需水系数反映了作物产量水平,因此农业理论节水潜力是在保证农业生产的前提下,可以减少的实际水资源消耗量,它为衡量区域节水措施的轻重缓急及必要性提供了理论依据。农业理论节水潜力确定的主要参数包括:

(1) 作物经济需水系数 β_{ET} 该系数是在保证作物不减产的基础上,实施节水措施后的作物需水量与作物潜在需水量的比值,可以通过田间试验或利用 SWAP 模型等方法进行确定,但要注意空间变异性。

(2) 回归水利用系数 β_p 和 β_1 在北方可以采用地表水和地下水联合应用的模式提高回归水利用系数;在南方可以充分发挥塘堰的调蓄抗旱作用。但抽取地下水需要增加投入消耗,因此需要制定合理的井渠灌溉用水比;塘堰数量的增加会占用更多的农田,所以需要确定合理的塘堰覆盖率和制定合理的塘堰用水规则来提高回归水利用系数。另外,对于一个灌溉系统的出流是下游系统的水源时,上游回归水利用率增大可能会对下游造成损失,因此回归水重复利用系数的提高也是要考虑下游的生态需水和避免下游出现连带缺水。

(3) 灌溉水利用系数 η_1 该系数研究比较成熟,在此不再赘述。

2 实例分析

柳园口灌区位于河南省开封市,是一个典型的黄河下游引黄灌区。以陇海铁路为界将灌区分为南北两个部分,北部引黄区主要种植水稻和冬小麦,进行引黄灌溉,地下水位较高;南部井灌区主要种植冬小麦、玉米、棉花、大豆等旱作物,通过开采地下水进行灌溉,地下水位较低。具体的灌区介绍见参考文献[15]。

选 2000 年 6 月到 2001 年 6 月为水平年(作物轮种年),具体的降水频率见文献[15]。根据前人的研

究^[16]确定各个变量和参数：有效降雨采用拟合公式 $P_e = -0.0014P^2 + 0.9206P$ (P 为月降雨量) 进行计算；灌区采用充分灌溉，因此 $\beta_{ET} = 1$ ；引黄区灌溉水利用系数为 0.4896，灌溉回归水利用系数和降雨回归水利用系数为 20%；井灌区灌溉水利用系数为 0.7486，灌溉回归水利用系数采用重复抽水进行叠加计算，由于井灌区渠道级数比较少，渠道在输水过程中水面蒸发损失率取 5%，其它无益损耗（如深层渗漏、人类活动等）所占比例取 5%，则产生的回归水量为总灌水量 0.1514 倍，这部分水被抽取后重复利用，利用率为 0.7486，则第一次重复抽水后利用的回归水占总量的 0.1133 倍，根据上述原理循环第二次后有效利用的回归水占总灌水量的 0.0285 倍，此值较小，循环终止，得灌溉回归水利用系数为 0.564；降雨回归水利用系数和灌溉回归水利用系数取相同值；从北部引黄区进入井灌区的水量为 1.55 万 m^3 ，有效利用率为 0.8901，作为井灌区的入流项 W_{in} 。由于地下水位比较高时才会对土壤水进行补给，也就是一般发生在降雨或灌溉后的一段时期内，所以 G_R 一般比较小，计算中忽略了 G_R 。根据式(4)和式(8)分别计算引黄区和井灌区的理论净灌溉需水量和理论毛灌溉需水量，将得到的引黄区和井灌区理论毛灌溉需水量相加得到了整个灌区理论毛灌溉需水量。刘路广^[15]和李小梅^[17]利用 SWAP 模型对柳园口灌区小麦、玉米和早稻的产量进行了模拟，当小麦、玉米和早稻的蒸发蒸腾量为充分灌溉下的潜在蒸发蒸腾量的 0.85、0.85 和 0.90 倍时作物产量并没有降低，而灌水量明显减少。贾宏伟^[18]研究了在常规淹灌模式和薄露灌溉模式下水稻的有效腾发量与实际腾发量的比值分别为 0.823 和 0.968。综合考虑取小麦、玉米和水稻的计算参数 β'_{ET} 分别为 0.85、0.85、0.90。根据聂杰^[19]对太湖平原水田灌溉的回归水重复利用分析，灌溉回归水利用系数在 30%~50% 之间。这里取引黄区灌溉回归水利用系数 β'_i 和降雨回归水利用系数 β'_p 为 50%，井灌区的回归水利用系数保持不变。规划水平年 2020 年引黄区和井灌区灌溉水利用系数 η'_i 分别取 0.55 和 0.85。根据式(9)~式(20)计算农业理论节水潜力和各种措施下的节水潜力。农业理论节水潜力、农业耗水理论节水潜力、农业取水理论节水潜力和农业回归水理论节水潜力与理论毛灌溉需水量的比值分别记为总节水率 η_w 、耗水节水率 $\eta_{w,ET}$ 、取水节水率 $\eta_{w,tran}$ 和回归水节水率 $\eta_{w,return}$ ，具体计算结果见表 1。

表 1 农业理论节水潜力计算结果

Table 1 Calculation results of theoretic agriculture water-saving potential										
研究区域	I_{net} /万 m^3	I_{gross} /万 m^3	ΔW /万 m^3	ΔW_{ET} /万 m^3	ΔW_{tran} /万 m^3	ΔW_{return} /万 m^3	η_w /%	$\eta_{w,ET}$ /%	$\eta_{w,tran}$ /%	$\eta_{w,return}$ /%
引黄区	2510.33	4242.72	1801.86	995.65	320.33	441.86	42.47	23.47	7.55	10.41
井灌区	6043.14	6787.07	2834.74	2638.49	321.06	0	41.77	38.88	4.73	0
总灌区	8553.47	11029.80	4636.59	3634.14	641.38	441.86	42.04	32.95	5.81	4.01

由表 1 可知，柳园口灌区农业理论节水潜力为 4636.59 万 m^3 ，总节水率为 42.04%，总体上理论节水潜力很大。在不同的节水措施下，农业耗水理论节水潜力最大，农业取水理论节水潜力次之，农业回归水理论节水潜力最小。由于引黄区和井灌区的种植作物和水源的不同，因此节水潜力并不相同。引黄区的农业理论节水潜力要比井灌区的小，主要原因是引黄区的作物种植面积远小于井灌区，虽然引黄区单位面积上的理论毛灌溉需水量节水较大，但总的节水量比较小。在引黄区，农业耗水理论节水潜力最大，农业回归水理论节水潜力次之，农业取水理论节水潜力最小；而井灌区，农业耗水理论节水潜力最大，农业取水理论节水潜力次之，农业回归水理论节水潜力最小。存在差别的原因是井灌区的回归水利用率较高，节水的空间较小，而引黄区则相反。在井灌区耗水节水率明显大于取水节水率和回归水节水率，因此在井灌区通过提高渠道衬砌率和回归水利用率等措施节水效果不佳；而引黄区的回归水节水率和取水节水率明显提高，其中回归水节水率达 10.41%，因此采取提高回归水利用率的节水措施（例如在引黄区部分灌溉采取开采地下水）节水效果较好，但提高回归水的重复利用需要增加新的投入，因此经济效益如何还有待进一步探讨。但总体上，无论是整个灌区，还是引黄区和井灌区，农业耗水节水潜力都是最大，而且明显的大于农业取水理论节水潜力和农业回归水理论节水潜力，这表明通过提高灌区的灌溉水利用系数和回归水的重复利用率节水量并不明显，而采取有效控制作物蒸发蒸腾量的节水措施效果最佳。因此柳园口灌区有必要从减少作物耗水（作物蒸发蒸腾量）角度进行灌区用水管理，推广合适的田间节水灌溉模式，或建立灌溉预报系统以提高灌溉预报精度，

减少奢侈蒸发蒸腾,提高灌区的用水效率。这对柳园口灌区节水措施的实施和水资源优化配置都有着重要的指导意义。

3 结 论

本文认为节水潜力的计算应该从取水、耗水和回归水3个方面综合考虑,提出了农业理论节水潜力的概念,并利用水量平衡原理对相应计算方法进行了推导。同时根据不同的节水措施,提出了农业耗水理论节水潜力、农业回归水理论节水潜力和农业取水理论节水潜力的概念及计算方法。

以柳园口灌区为例进行了农业理论节水潜力的计算,结果表明柳园口灌区农业理论节水潜力为4 636.59万 m^3 ,总节水率为42.04%,总体上节水潜力很大。在不同的节水措施下,总灌区和井灌区的农业耗水理论节水潜力最大,农业取水理论节水潜力次之,农业回归水理论节水潜力最小;而引黄区农业耗水理论节水潜力最大,农业回归水理论节水潜力次之,农业取水理论节水潜力最小。但总体上柳园口灌区农业耗水理论节水潜力最大,因此柳园口灌区应该通过种植结构调整、推广适宜的田间节水灌溉模式、加强用水管理等措施减少奢侈蒸发蒸腾,提高水资源的高效利用。

参考文献:

- [1] 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):239-243. (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):239-243. (in Chinese))
- [2] 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. Denver: United States Commission on Irrigation and Drainage, 1994.
- [3] KELLER A A, SECKLER D W, KELLER J. Integrated water resources systems: theory and policy implications[R]. Colombo: IWMI, Sri Lanka, 1996: 14.
- [4] 段爱旺,信乃谄,王立祥.节水潜力的定义和确定方法[J].灌溉排水,2002,21(2):25-28. (DUAN Ai-wang, XIN Nai-quan, WANG Li-xiang. The definition and calculation of agricultural water saving potential[J]. Irrigation and Drainage, 2002, 21(2):25-28. (in Chinese))
- [5] DAVENPORT C D, HAGAN M R. Agricultural water conservation in California, with emphasis on the San Joaquin Valley[R]. Dept of Land, Air and Water Resources, University of California, 1982: 219.
- [6] 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,2000:14-28. (SHEN Zhen-rong, WANG Lin, YU Hu-liang, et al. New concepts of water saving-study and application of real water saving [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2000: 14-28. (in Chinese))
- [7] 傅国斌,李丽娟,于静洁,等.内蒙古河套灌区节水潜力的估算[J].农业工程学报,2003,19(1):54-58. (FU Guo-bin, LI Li-juan, YU Jing-jie, et al. Estimation of water-saving potential in the Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1):54-58. (in Chinese))
- [8] 彭致功,刘钰,许迪,等.基于RS数据和GIS方法估算区域作物节水潜力[J].农业工程学报,2009,25(7):8-12. (PENG Zhi-gong, LIU Yu, XU Di, et al. Application of RS and GIS technique for water-saving potential estimation of regional crops[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7):8-12. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 谢先红,崔远来.灌溉水利利用效率随尺度变化规律分布式模拟[J].水科学进展,2010,21(5):681-688. (XIE Xian-hong, CUI Yuan-lai. Distributed hydrological modeling of irrigation water use efficiency at different spatial scales[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(5):681-688. (in Chinese))
- [11] SOLOMON K H, DAVIDOFF B. Relation unit and subunit irrigation performance[J]. Transactions of the ASAE, 1999, 42(1):115-122.

- [12] TUONG T P, BHUIYAN S I. Increasing water-use efficiency in rice production: farm-lever perspectives[J]. *Agricultural Water Management*, 1999, 40(3): 117-122.
- [13] 李远华, 崔远来. 不同尺度灌溉水高效利用理论与技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 62-78. (LI Yuan-hua, CUI Yuan-lai. Theory and technology of high efficient utilization of irrigation water at different scales[M]. Beijing: China Water-Power Press, 2009: 62-78. (in Chinese))
- [14] 崔远来, 谭芳, 郑传举. 不同环节灌溉用水效率及节水潜力分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 788-793. (CUI Yuan-lai, TAN Fang, ZHENG Chuan-ju. Analysis of irrigation efficiency and water saving potential at different scales[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(6): 788-793. (in Chinese))
- [15] 刘路广, 崔远来, 冯跃华. 基于 SWAP 和 MODFLOW 模型的引黄灌区用水管理策略[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 9-17. (LIU Lu-guang, CUI Yuan-lai, FENG Yue-hua. Water management strategies of Yellow River irrigation district based on Swap and MODFLOW models[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(4): 9-17. (in Chinese))
- [16] CUI Y L, KHAN S. A top down approach to quantify regional water balance components in LIS area[R]. Griffith: CSIRO Land & Water, 2002.
- [17] 李小梅. 基于 SWAP 和 SWAT 联合应用的灌区水管理研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009. (LI Xiao-mei. Water management for irrigation area based on SWAP and SWAT combined application[D]. Wuhan: Wuhan University, 2009. (in Chinese))
- [18] 贾宏伟, 卢成. 基于非充分灌溉理论的水稻田间水利用效率的计算方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 38-41. (JIA Hong-wei, LU Cheng. Calculation method of field water use efficiency of rice based on the theory of deficit irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(6): 38-41. (in Chinese))
- [19] 聂杰. 太湖平原水田区灌溉回归水分析[J]. 中国农村水利水电, 1992(2): 2-5. (NIE Jie. Analysis of irrigation return flow in the rice-growing district of Taihu Lake Plain [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 1992(2): 2-5. (in Chinese))

New calculation method for water-saving potential in agriculture based on water balance principle*

LIU Lu-guang, CUI Yuan-lai, WANG Jian-peng

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

Abstract: The water saving potential in agriculture plays an important role in scheme evaluation of water-saving performance, assessment of water use efficiency and optimal allocation of water resources. The evaluation indices and calculation methods are reviewed, and an innovative concept for water-saving potential in agriculture is proposed by taking into account water intake, water consumption and agriculture return water. The corresponding method for water-saving potential is given based on water balance principle. For different water-saving measures, the method can estimate the potential reductions in water intake and consumption, and the potential savings in agricultural return water. The new method is applied to the Liuyuankou Irrigation System (LIS) for a theoretical study on water-saving potential in agriculture. The result shows that the theoretical water saving in LIS could be as much as $4\,636.59 \times 10^4 \text{ m}^3$. In which, the potential reduction in water consumption would be the largest, and followed by water intake and the potential savings in agricultural return water. The result provides a theoretical basis to the implementation for water-saving measures and effective utilization of water resources in LIS.

Key words: water-saving potential; water intake; water consumption; agricultural return water; water balance; water resources

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50879060) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (No. 20090141110024).