

基于作物种植结构优化的农业节水潜力分析

——以武威市凉州区为例

徐万林, 栗晓玲

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 以武威市凉州区为例, 以传统节水潜力计算方法为基础, 在保证粮食安全、工业原料需求、畜牧饲草等要求的前提下, 增加了农业种植结构优化因素, 提出了基于种植结构优化的农业节水潜力概念和计算方法。其计算过程包括降低灌溉定额、提高灌溉水利用系数、优化种植结构三个部分。运用该方法计算出2005年武威市凉州区基于种植结构优化的农业节水潜力为2.63亿 m^3 , 比传统的农业节水潜力提高13.3%, 农业总产值增加6.04亿元, 净收益增加4.32亿元。

关键词: 节水潜力; 净灌溉定额; 种植结构优化; 灌溉水利用系数; 凉州区

中图分类号: S274.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)05-0161-05

灌区节水潜力的准确估算, 不仅对灌区节水灌溉规划有科学的指导意义, 而且对区域水资源的优化配置、大型水利枢纽工程的规划和设计、乃至区域经济发展等都有着十分重要的现实意义^[1]。然而到目前为止, 对农业灌溉节水潜力仍未形成一个统一、公认的概念, 相应的评价和计算体系也没有很好地建立起来^[2]。以往节水潜力的计算一般都是从作物需水量出发, 考虑充分利用有效降雨量和通过节水工程措施来提高灌溉水利用系数后计算出农业灌溉需水量, 然后再与现状灌溉用水比较, 两者之差便是节水潜力。

张艳妮^[3]和高传昌^[4]从作物需水量出发考虑有效降水、输水损失、田间损失等因素后, 构造了一个理论节水潜力的计算公式, 并根据水资源利用管理水平、大众的节水意识、水的价格、有关水的法规的制定和执行情况, 水利投资等得到现实调节因子, 分别求得了山东省的农业节水潜力和河南省中牟县杨桥灌区的节水潜力。段爱旺^[5]认为农业节水潜力由狭义节水潜力和广义节水潜力两部分组成, 狭义节水潜力是指通过一定的节水技术措施直接减少农业用水过程中的水量损失, 从而对水资源的直接消耗所节约出来的水量; 广义节水潜力是指通过农艺措施提高作物用水向社会需求的农产品的转化效率, 从而通过提高单位土地的农产品生产能力来减少区域内对水资源的总需求量所节约的水量, 因此在农业节水潜力的开发过程中, 需要工程节水措施、管理节水措施和农艺节水措施共同发挥作用。现有的农

业节水潜力研究是以现状灌溉用水量为基础, 充分考虑用水管理制度的条件下, 与作物需水量相比较所得出的水量^[3]。这些方法都没有考虑种植结构优化的节水潜力。本研究在考虑了灌溉水利用系数提高的基础上, 对凉州区农业种植结构进行优化, 计算优化后的灌溉需水量与现状实际灌溉需水量之差, 为基于农业种植结构优化的农业节水潜力。

1 研究及计算方法

1.1 研究方法

农业灌溉节水的途径主要包括降低灌溉定额、提高灌溉水利用系数、优化种植结构三个措施。所谓降低灌溉定额是指用现状实际灌溉定额减去作物生育期内有效降雨量和直接耗用的地下水, 也就是得到净灌溉定额; 提高灌溉水利用系数可以通过改善节水工程设施和提高管理措施等手段实现; 在满足研究区域水量限制、经济需求、生活需求等条件下, 以农业产出的净利润最大为目标函数, 建立线性优化模型来实现作物种植结构的优化。本文主要研究上述三个措施的节水潜力。

1.2 区域毛灌溉需水量的计算

毛灌溉需水量的计算包括现状计算毛灌溉需水量、提高灌溉水利用系数后的毛灌溉需水量和优化种植结构后的毛灌溉需水量三部分, 计算公式分别如下:

$$W_1 = \sum_{i=1}^N A_{0i} w_{净i} / \eta_i \quad (1)$$

收稿日期: 2010-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(50879071); 水利部公益性行业科研基金(200801104); 西北农林科技大学青年学术骨干支持计划资助

作者简介: 徐万林(1984—), 男, 山东汶上人, 硕士生, 主要从事农业水土资源利用方面的研究工作。E-mail: xuwanlin666@163.com。

通讯作者: 栗晓玲(1968—), 女, 四川开江人, 博士, 教授, 主要从事生态需水与水资源配置方面的研究。E-mail: lixiaoling17@126.com。

$$W_2 = \sum_{i=1}^N A_{0i} w_{\text{净}i} / \eta_2 \quad (2)$$

$$W_3 = \sum_{i=1}^N A_i w_{\text{净}i} / \eta_2 \quad (3)$$

式中: W_1 为现状计算毛灌溉需水量; W_2 为提高灌溉水利用系数后的毛灌溉需水量; W_3 为优化种植结构后的毛灌溉需水量; A_{0i} 、 A_i 分别为现状各作物的种植面积及优化后各作物的种植面积; $w_{\text{净}i}$ 为作物的净灌溉定额; η_1 、 η_2 分别为现状灌溉水利用系数和提高后的灌溉水利用系数; N 为作物种类。

1.3 种植结构优化模型

种植结构优化模型是以作物净效益最大为目标函数,以各作物的种植面积 A_i 为决策变量, i 为作物的种类。

1.3.1 目标函数 凉州区种植结构优化的目的在于在提高灌溉水利用系数的前提下,通过调整各作物的种植面积,以达到农业产出的净利润最大,同时降低农业灌溉需水量。目标函数为:

$$F = \sum_{i=1}^N A_i \cdot [P_i \cdot Y_i - C_i - P_w \cdot w_{\text{毛}i}] \quad (4)$$

式中: F 为凉州区农业灌溉用水总净效益; P_i 为第 i 种作物的市场价格; Y_i 为第 i 种作物的单位面积产量; C_i 为第 i 种作物的单位面积的成本,包括种子、肥料和劳动力成本等; P_w 为水价; $w_{\text{毛}i}$ 为第 i 种作物的毛灌溉定额;其余符号意义同前。其中:

$$w_{\text{毛}i} = w_{\text{净}i} / \eta_2 \quad (5)$$

1.3.2 约束条件

(1) 水量约束

作物的总灌溉需水量不大于提高灌溉水利用系数后的毛灌溉需水量,即

$$\sum_{i=1}^N A_i \cdot w_{\text{毛}i} \leq W_2 \quad (6)$$

(2) 粮食约束

根据参考文献[6]和当地居民生活粮食结构,区域每年人均粮食不低于 420 kg(将薯类按 5 kg 换算成 1 kg 粮食计算),人均小麦不低于 200 kg,即

$$TF \geq 420 \cdot P \quad (7)$$

$$TW \geq 200 \cdot P \quad (8)$$

式中: TF 为粮食产量; TW 为小麦产量; P 为当年人口总数。

其中

$$TF = A_{\text{小麦}} \cdot Y_{\text{小麦}} + A_{\text{玉米}} \cdot Y_{\text{玉米}} + A_{\text{薯类}} \cdot Y_{\text{薯类}} / 5 \quad (9)$$

$$TW = A_{\text{小麦}} \cdot Y_{\text{小麦}} \quad (10)$$

式中, $A_{\text{小麦}}$ 、 $A_{\text{玉米}}$ 、 $A_{\text{薯类}}$ 分别为小麦、玉米、薯类的种

植面积; $Y_{\text{小麦}}$ 、 $Y_{\text{玉米}}$ 、 $Y_{\text{薯类}}$ 分别为小麦、玉米、薯类单位面积的产量。

(3) 饲草约束

饲草应满足当地牲畜的需求。

$$A_{\text{草}} \cdot Y_{\text{草}} \geq (S_{\text{大}} \cdot M_{\text{w大}} + S_{\text{小}} \cdot M_{\text{w小}}) / 10 \quad (11)$$

式中: $A_{\text{草}}$ 为饲草种植面积; $Y_{\text{草}}$ 为单位面积干饲草的产量; $S_{\text{大}}$ 、 $S_{\text{小}}$ 分别为大、小牲畜头数; $M_{\text{w大}}$ 、 $M_{\text{w小}}$ 分别为单头大、小牲畜每年所需鲜饲草量,将 10 kg 鲜饲草折合成 1 kg 干饲草计算。

(4) 蔬菜约束

每人每天不低于 0.8 kg 的蔬菜。

$$A_{\text{菜}} \cdot Y_{\text{菜}} \geq 0.8 \cdot P \cdot 365 \quad (12)$$

式中: $A_{\text{菜}}$ 为蔬菜种植面积; $Y_{\text{菜}}$ 为蔬菜的单位面积产量;其余符号意义同前。

(5) 大麦约束

$$A_{\text{大麦}} \geq A_{\text{大麦 min}} \quad (13)$$

式中: $A_{\text{大麦}}$ 为大麦种植面积; $A_{\text{大麦 min}}$ 为大麦种植面积的下限。

(6) 面积约束

各种作物的种植面积的总和不大当地的总灌溉面积。

$$\sum_{i=1}^N A_i \leq A \quad (14)$$

式中: A 为当地的总灌溉面积。

(7) 其他约束

根据当地的实际情况确定其它作物的最低产量、最小种植面积、最大种植面积的约束条件。

1.4 节水潜力计算公式

节水潜力由三部分组成,其计算公式如下:

$$\Delta W = \Delta W' + \Delta W'' + \Delta W''' \quad (15)$$

式中: ΔW 为节水潜力; $\Delta W'$ 为由于定额降低的节水量; $\Delta W''$ 为由于灌溉水利用系数的提高而产生的节水量; $\Delta W'''$ 为由于种植结构优化而产生的节水量。它们的计算公式分别对应如下:

$$\Delta W' = W_0 - W_1 \quad (16)$$

$$\Delta W'' = W_1 - W_2 \quad (17)$$

$$\Delta W''' = W_2 - W_3 \quad (18)$$

式中, W_0 为现状实际灌溉用水量。

2 研究区概况及已知资料

2.1 研究区概况

凉州区位于甘肃省河西走廊东端,属于石羊河流域。总面积 5 081 km²,平均海拔 1 632 m,地势平坦,日照充足,属典型的大陆性气候。凉州区为农业

经济大区,农业为用水大户,农用水量占全区水资源总量的 96%,工业、生活、乡企和其它用水分别占 1%,2%,1%^[7]。该地区用水结构极不合理,极大地限制了当地工业和城市的发展。区域灌溉农业用水效率也不高,灌溉水利用系数为 0.51,种植结构不合理,有研究表明,50%的潜在节约水量可以通过灌溉水的管理来实现^[8],说明凉州区农业用水具有很大的节水潜力。2005 年凉州区的降水量为 127.3

mm,降水频率为 91.3%,属枯水年,在枯水年研究节水潜力,具有非常现实的意义。

2.2 净灌溉定额及灌溉水利用系数

在假定土壤水分不变的条件,净灌溉需水量等于作物需水量减去有效降水量及作物直接耗用的地下水^[1]。根据已知资料^[6,9]得出凉州区各种作物生育期多年平均净灌溉定额,如下表。

表 1 凉州区主要作物净灌溉定额
Table 1 Net irrigation quota for main crops in Liangzhou

项目 Item	小麦 Wheat	玉米 Corn	大麦 Barley	大豆 Soybean	薯类 Potato	胡麻 Flax	油菜 Rape	青饲料(干) Succulence (Dry)	蔬菜 Vegetables	瓜类 Melon	苹果 Apple	梨 Pear	葡萄 Grape	其它 Other
净灌溉定额 $W_{净}(\text{m}^3/\text{hm}^2)$	5151	4283	5025	4450	3394	4014	4275	3375	4500	2324	2523	3090	2655	2500

根据《石羊河流域近期重点治理规划》^[10]及吕廷波硕士论文等资料^[11],2005 年凉州区的灌溉水利用系数为 0.51(η_1),如果通过采取一些节水工程措施,可以将其提高到 0.60(η_2)。

2.3 现状种植结构

作为西北的重点经济开发区,凉州区年均生产粮食 6.3 亿 kg,人均年粮食占有量为 643.83kg^[12],

远超过了 400kg/(年·人)的粮食生产安全线,但这主要依靠农业的高投入,并且是以地表水与地下水的过量开采为代价的。在水资源比较紧缺的凉州区,当前的种植结构不合理,需要通过优化调整。

根据 2004 - 2005 年武威统计年鉴^[13],2005 年凉州区主要农作物的灌溉面积如下表。

表 2 凉州区主要作物的种植面积及比例
Table 2 The main crop acreage and proportion in Liangzhou

项目 Item	小麦 Wheat	玉米 Corn	大麦 Barley	大豆 Soybean	薯类 Potato	胡麻 Flax	油菜 Rape	青饲料(干) Succulence (Dry)	蔬菜 Vegetables	瓜类 Melon	苹果 Apple	梨 Pear	葡萄 Grape	其它 Other	合计 Total
现状种植面积 $A_0(10^4 \text{ hm}^2)$	3.15	3.07	0.39	0.08	0.65	0.05	0.96	0.84	1.78	0.20	0.61	0.14	0.07	0.60	12.60
现状种植 比例 $a_0(\%)$	25	24.4	3.1	0.6	5.2	0.4	7.6	6.7	14.2	1.6	4.8	1.1	0.5	4.8	100

2.4 作物单产、价格及单位面积成本

根据资料^[13]、栗晓玲博士论文^[9]和调查资料将

凉州区主要作物的单产、市场价格以及单位面积的劳动成本列成表 3。

表 3 各种作物的单产、单价和单位面积种植成本
Table 3 Yield and planting costs of various crops per unit area and price per unit weight

项目 Item	小麦 Wheat	玉米 Corn	大麦 Barley	大豆 Soybean	薯类 Potato	胡麻 Flax	油菜 Rape	青饲料(干) Succulence (Dry)	蔬菜 Vegetables	瓜类 Melon	苹果 Apple	梨 Pear	葡萄 Grape	其它 Other
单产(kg/hm ²)	6429	10470	7050	3885	66200	2550	2700	15000	48075	51750	4973	2342	6128	3000
单价(¥/kg)	1.6	1.3	1.7	4	0.5	3.6	2.6	1.2	1.3	0.6	2	1	2	2
单位面积 成本(¥/hm ²)	6859	7788	5250	5500	5250	3900	3650	8250	31200	9625	4950	4950	8000	4000

2.5 其他已知资料

根据资料^[13],2005 年凉州区人口 101.4 万人,大牲畜 27 万头(折合成牛),小牲畜 67.21 万头(折

合成羊),每头大牲畜每天需要 10 kg 鲜饲草,每头小牲畜每天需要 5 kg 鲜饲草。2005 年的灌溉水价按 0.11 元计算^[14]。

以 2005 年凉州区的啤酒产业发展需求计算,啤酒大麦的种植面积不得低于 0.4 万 hm^2 。根据葡萄酒产业的需要,2005 年凉州区葡萄的种植面积不得低于 0.2 万 hm^2 。近年来,凉州区为发展经济,正在筹划年产 5 吨大豆异黄酮的项目,根据原料需要,大豆种植面积不能低于 0.129 万 hm^2 。其他作物,如胡麻、油菜、瓜类等约束都是根据当地实际情况进行合理的拟定,除以上主要作物外,还有很多少量分散种植的农作物,其参数都折合成了糜子进行计算,由于种植面积比较小,并且很分散,所以不利于统一优化,故将这些作物的总种植面积的下限设为 0.5 万 hm^2 。

3 凉州区节水潜力的计算及结果分析

3.1 现状定额降低的节水量

根据已知资料,2005 年现状实际灌溉用水量为

11.14 亿 m^3 ,根据表 1 中作物的净灌溉定额及公式(1)计算得出现状计算毛灌溉需水量为 10.43 亿 m^3 ,故由公式(16)计算出现状定额降低的节水量为 0.71 亿 m^3 ,反映了作物需水量减去有效降水量及作物直接耗用的地下水产生的节水量。

3.2 灌溉水利用系数提高后的节水量

由表 1 和公式(2)及公式(17)依次计算出提高灌溉水利用系数后的毛灌溉需水量和灌溉水利用系数提高的节水量分别为 8.86 亿 m^3 和 1.57 亿 m^3 ,反映了由于灌溉工程设施的改善和管理水平的提高产生的节水量。

3.3 种植结构优化的节水量

种植结构优化模型采用线性规划模型,各种作物的优化种植面积见表 4。

表 4 优化后各种作物的种植面积及比例
Table 4 Optimized acreage and proportion of various crops

项目 Item	小麦 Wheat	玉米 Corn	大麦 Barley	大豆 Soybean	薯类 Potato	胡麻 Flax	油菜 Rape	青饲料(干) Succulence (Dry)	蔬菜 Vegetables	瓜类 Melon	苹果 Apple	梨 Pear	葡萄 Grape	其它 Other	合计 Total
优化后的种植面积 $A_i(10^4 \text{ hm}^2)$	3.15	0.97	0.40	0.13	0.92	0.05	0.67	1.48	2.49	1.00	0.65	0.00	0.20	0.50	12.60
优化后的种植比例 $a_i(\%)$	25	7.7	3.2	1	7.3	0.4	5.3	11.7	19.7	7.9	5.2	0	1.6	4	100

由表 4 和公式(3)及公式(18)可计算出优化种植结构后的毛灌溉需水量为 8.51 亿 m^3 ,种植结构优化产生的节水量为 0.35 亿 m^3 。

3.4 基于种植结构优化后的节水潜力分析

根据公式(15)计算出考虑灌溉水利用系数和种植结构优化后的节水潜力为 2.63 亿 m^3 。

现状定额降低的节水量占总节水潜力的 27%;提高灌溉水利用系数的节水量占总节水潜力的 59.7%;农业种植结构优化的节水量占总节水潜力的 13.3%。从利用各种措施产生的节水潜力的比例来看,通过加强用水管理减少灌溉定额和通过实施节水工程措施提高灌溉水利用系数所产生的节水量仍占绝大部分,但在凉州区水资源极度紧缺的情况下,通过种植结构的优化所产生的节约水量也是非常可观的。

3.5 经济效益分析

从优化结果看,由于玉米经济效益不高,面积降幅很大,在满足当地的粮食需求的条件下应尽量减少种植面积;经计算梨的净效益为负值,故建议不再种植;由于凉州区光照充足,非常适合推广日光温室大棚蔬菜,2005 年仅农民人均蔬菜纯收入就达 500

元以上,通过优化也可以看出,该地区的温室蔬菜还需大力推广;同样由于气候因素,凉州生产的瓜类有着独特的品质,再加上该地区瓜果种植历史悠久,技术成熟,且经济效益很好等原因,瓜类的种植面积需大幅提高;畜牧业在当地经济中所占比重较大,效益也比较好的,为满足饲草需求,大幅增加了饲草的种植面积,同时由于退耕还草,也改善了当地的生态环境。

依据资料^[13],以 2005 现价计算,2005 年凉州区的农业总产值为 25.25 亿元,净收益为 11.47 亿元。通过采取节水工程措施提高灌溉水利用系数和种植结构优化后,按 2005 年现价计算,凉州区的农业总产值为 31.29 亿元,净收益为 15.79 亿元,与现状相比较,农业总产值增加了 6.04 亿元,净收益增加了 4.32 亿元。这说明减少用水效率低、经济价值低的农作物种植面积,增加用水效率高、经济价值高的作物种植面积后,能够增加农民的收入,减少农业的投入,这样既使当地农民获得了实惠,又避免了资源的浪费。

4 讨论

本研究在传统节水潜力的基础上增加了优化部

分,虽然使节约的水量有了明显的增加,并增加了当地农民的纯收入,使节水潜力的概念有所创新,但实际上,区域内通过这些节水措施所节约出来的水资源量并没有损失,仍然存留在区域水资源系统内部,或被转移到其他水资源紧缺的部门或行业,因此,从单个用水部门或行业来看,节约了取用水量,但就区域整体而言,取用水的减少量并没有实现真正意义上的节水。针对这种问题,必须从水的资源消耗特性出发,站在宏观区域角度上,定量研究水资源所能节约下来的损耗量——耗水节水量,即区域真正节水潜力^[15]。

参考文献:

- [1] 傅国斌,于静洁,刘昌明,等.灌区节水潜力估算的方法及应用[J].灌溉排水,2001,20(2):24—28.
- [2] 张义盼,崔远来,史伟达.农业灌溉节水潜力及回归水利用研究进展[J].节水灌溉,2009,(5):50—54.
- [3] 张艳妮,白清俊,马金宝,等.山东省灌溉农业节水潜力计算分析——以2002~2004年为例[J].山东农业大学学报(自然科学版),2007,38(3):427—431.
- [4] 高传昌,类维蒙.灌溉农业节水潜力计算分析——以2001~2003年中牟县杨桥灌区为例[J].安徽农业科学,2009,37(18):8619—8620.
- [5] 段爱旺,信乃谏,王立祥.节水潜力的定义和确定方法[J].灌溉排水,2002,21(2):25—35.
- [6] 康绍忠,栗晓玲,杜太生,等.西北旱区流域尺度水资源转化规律及其节水调控模式——以甘肃石羊河流域为例[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [7] 程国辉.凉州区农村饮用水水源地水质分析及治理[J].农业科技与信息,2009,(20):11—12.
- [8] Shangguan Z P. A model for regional optimal allocation of irrigation water resources under deficit irrigation and its applications[J]. Agricultural Water Management, 2002, 52(2): 139—154.
- [9] 栗晓玲.石羊河流域面向生态的水资源合理配置理论与模型研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [10] 甘肃省水利水电勘测设计研究院,清华大学.石羊河近期重点治理规划[R].武威:石羊河流域管理局,2007.
- [11] 吕廷波.西北干旱内陆区石羊河流域灌溉水利用率估算与评价[D].北京:中国农业大学,2007.
- [12] 甘肃农村年鉴编委会.甘肃农村年鉴(2004、2005、2006)[M].北京:中国统计出版社,2004~2006.
- [13] 武威市统计局.2004~2005武威市统计年鉴[M].兰州:甘肃科学技术出版社,2006.
- [14] 凉州区水务局.石羊河流域重点治理凉州区(水务)工作指南[R].武威:凉州区水务局,2008.
- [15] 裴源生,张金桦,赵勇.宁夏灌区节水潜力的研究[J].水利学报,2007,38(2):239—249.

Agricultural water-saving potential analysis based on crop planting structure optimization

——A case study of Liangzhou

XU Wan-lin, SU Xiao-ling

(College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: For the situation of Liangzhou in Wuwei City, agricultural planting structure optimization measures are added to traditional water-saving potential under the premise of food security, industrial demand for raw materials, live-stock fodder and so on. The concept of agricultural water-saving potential which is based on structure optimization and its calculation method are proposed. Its calculation process includes reducing irrigation quota, raising irrigation water efficiency and optimizing planting structure. Liangzhou District was selected as a case study in 2005, the agricultural water-saving potential based on structure optimization is 263 million cubic meters, which is 13.3% more than traditional methods, as a result, the agricultural output increased by 604 million yuan and the net income increased by 432 million yuan.

Keywords: water-saving potential; net irrigation quota; planting structure optimization; utilization coefficient of irrigation water; Liangzhou