

基于水资源高效利用的农业种植结构及灌溉制度优化 ——以民勤灌区为例

徐万林, 粟晓玲, 史银军, 南彩艳, 杨雪菲

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:在非充分灌溉条件下,为解决灌区内作物之间和单作物生育期内不同生育阶段的灌水配置问题,依据大系统递阶分析原理,建立了一个能同时优化作物灌溉制度、种植结构和灌溉定额的双层模型。模型第一层以作物相对产量最大为目标,采用动态规划,优化了作物灌溉制度;第二层以灌区内农业净效益最大为目标,采用非线性优化,优化了作物种植结构和灌溉定额。该模型应用范围较广,既能为政府部门提供宏观决策,又能为农民提供具体的灌水办法。以民勤灌区为例,优化结果表明,在75%保证率下比现状节水1.29亿 m^3 ,农业生产总值和净效益分别增加5.99,4.25亿元。

关键词:非充分灌溉;灌溉制度;种植结构优化;大系统递阶分析;民勤县

中图分类号:S274.1;S344

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2011)01-0205-05

The Optimization of Agricultural Planting Structure and Irrigation System Based on the Efficient Use of Water Resources —A Case Study of Minqin

XU Wan-lin, SU Xiao-ling, SHI Yin-jun, NAN Cai-yan, YANG Xue-fei

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

Abstract: In order to solve the problem of allocating irrigation water between single-crop different growth stages during the growing and crops in an irrigation district, a double-layer model which can simultaneously optimize crop irrigation system, plant structure and irrigation quota was established based on principles of hierarchical analysis of large-scale systems under the condition of non-sufficient irrigation. The first layer model optimized single-crop irrigation system based on dynamic programming with the objective of maximum crop relative yield, and the second layer model optimized crop planting structure and irrigation quota based on nonlinear optimization with the objective of maximum net benefits agriculture. The model has a wide range of applications that not only offers macroeconomic policy-making for government departments, but also provides farmers with specific irrigation methods. 129 million cubic meters water was saved, gross and net agricultural production benefits were increased by 599 and 425 million Yuan respectively with the application of the model in Minqin in representative year of 75% guarantee rate.

Key words: non-sufficient irrigation; irrigation system; planting structure optimization; hierarchical analysis of large-scale systems; Minqin county

发展节水农业,实现农业高效用水是一个宏大的系统工程,也是一个相互关联的技术体系^[1]。在一个灌区内,农作物的生产,不但涉及空间因素,如作物种植面积的调整,还涉及到时间因素,如作物不同生育期的配水。特别是在西北干旱缺水的地区,有限的灌

溉水资源往往不足以使所有的作物都能得到充分灌溉,这就存在作物之间争水的问题;由于存在非充分灌溉,在单作物的生育期内不同的生育阶段也存在着灌溉水的优化配置情况。

针对这类问题,一般由两层或两层以上优化结构

收稿日期:2010-09-08

修回日期:2010-10-15

资助项目:国家自然科学基金(50879071);国家科技支撑计划(2006BAD29B02);公益性行业科研专项(200801104);西北农林科技大学青年学术骨干支持计划

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。E-mail:xuwanlin666@163.com

通信作者:粟晓玲(1968—),女,四川开江人,教授,博士,主要从事生态需水与水资源配置方面的研究。E-mail:suxiaoling17@126.com

的模型来解决。郭宗楼^[2]提出了多种作物间水量分配的双层动态规划迭代方法,第一层为单作物灌溉制度的优化模型,第二层为作物之间的灌水优化分配模型。崔远来等^[3]建立了一个对有限水量在多种作物间进行优化分配的两层分解协调模型。这两种方法均采用了两次动态规划的方法优化了作物间的配水和单作物的灌溉制度,但是都没有对作物的种植结构进行优化。Zhouping shangguan^[4]与邱林^[5]等分别针对杨凌示范区和宁陵县建立了一个大系统递阶系统模型,优化出了作物的种植结构、作物间的配水和单作物的灌溉制度,模型包含三层,每层模型均采用动态规划,结构比较复杂,程序编写比较繁琐。本文采用大系统递阶分析原理,建立了包含两层结构的优化模型。第一层单作物灌溉制度的优化模型采用动态规划的方法,第二层作物种植结构和作物灌溉定额优化模型采用非线性优化的方法,这样既容易编程实现,又优化出了作物种植结构、作物灌溉定额和单作物的灌溉制度。

1 计算模型

1.1 模型概述

模型分为两个层次:第一层是单作物的生育期内各生育阶段灌溉配水的优化;第二层是灌区内作物种植结构以及灌溉定额的优化。从灌区层面开始,先对作物 i 分配一定的灌溉定额 Q_i ,以一定的水量为间隔,不断更改灌溉定额,用动态规划对作物 i 的灌溉制度进行优化,得出系列灌溉定额和相对应的产量,再拟合出作物 i 的水分生产函数 Y_i ,将作物 i 的水分生产函数 Y_i 返回到第二层,建立以灌区总净效益为目标函数的非线性优化模型,优化出作物 i 的种植面积和灌溉定额,再将优化出的灌溉定额返回第一层,优化出作物 i 的最优灌溉制度。两层模型均用 MATLAB 编程实现。模型的结构见图 1。

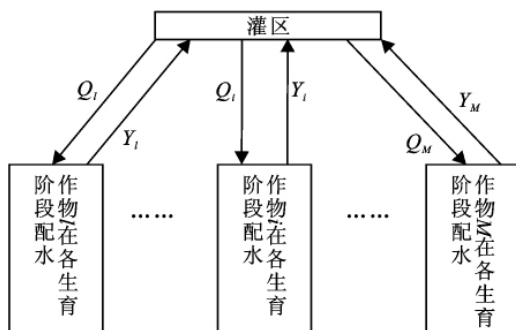


图 1 模型结构示意图

1.2 第一层模型——单作物优化灌溉制度模型

单作物灌溉制度的优化是将有限的灌水量最优化地分配给作物的各个生育阶段,使其产量达到最高。

本层模型是基于 Jensen 模型,利用动态规划实现。

1.2.1 阶段变量 把各生育阶段看作阶段变量 $n, n=1, 2, 3, \dots, N$ 。

1.2.2 状态变量 共有两个状态变量,一个是各生育阶段的可利用灌溉水量,记为 q_n (mm),另一个是在这个生育阶段土壤计划湿润层中总可用水量,记为 S_n (mm)。

$$S_n = 10000\gamma H_n(\theta_n - \theta_w) \quad (1)$$

式中: γ ——土壤干容重(g/cm^3); H_n ——计划湿润层深度(m); θ_n ——在生育阶段 n 计划湿润层中土壤平均含水率(%); θ_w ——凋萎系数(%),约为田间持水量的 60%。

1.2.3 决策变量 每个生育阶段的灌溉水量 d_n (mm), $n=1, 2, \dots, N$ 。

1.2.4 系统方程

(1)水量分配方程:

$$q_n = q_{n-1} + R_n - d_n - L_n \quad (2)$$

式中: q_n ——生育阶段 n 末的可利用灌溉水量(mm); q_{n-1} ——生育阶段 n 初的可利用灌溉水量(mm); R_n ——生育阶段 n 增加的灌溉水量(mm),本文取为 0; d_n ——生育阶段 n 的灌溉水量(mm); L_n ——生育阶段 n 中除灌溉外用于其它用途的水量(mm),本文取为 0。

(2)计划湿润层中的土壤水平衡方程:

$$S_n + ET_n + k_n = S_{n-1} + \eta d_n + p_n + CK_n \quad (3)$$

式中: S_n ——在生育阶段 n 末可利用土壤水量(mm); S_{n-1} ——在生育阶段 n 初可利用土壤水量(mm); ET_n ——生育阶段 n 的蒸发蒸腾量(mm); k_n ——渗漏量(mm),本文取为 0; p_n ——有效降雨量(mm); η ——有效灌溉水利用系数; CK_n ——地下水补给量(mm),本文取为 0。

1.2.5 目标函数

根据 Jensen 模型,以单位面积的相对产量最大为目标函数,如下:

$$F^* = \max\left(\frac{Y_a}{Y_m}\right) = \max \prod_{n=1}^N \left(\frac{ET_n}{ET_m}\right)^{\lambda_n} \quad (4)$$

式中: Y_m ——作物的最高产量; Y_a ——作物的实际产量; λ_n ——生育阶段 n 的作物敏感指数数; ET_m ——第 n 个生育阶段充分灌溉条件下的蒸发蒸腾量(mm)。

1.2.6 约束条件

$$0 \leq d_n \leq q_n \quad (5)$$

$$\sum_{n=1}^N (d_n + L_n - R_n) \leq Q_i \quad (6)$$

$$0 \leq q_n \leq Q_i + \sum_{i=1}^N (R_n - L_n - d_n) \quad (7)$$

$$0 \leq ET_n \leq ET_m \quad (8)$$

$$\theta_w \leq \theta_n \leq \theta_f \tag{9}$$

式中: Q_i ——从灌区中分配给作物 i 的灌溉定额 (mm); θ_f ——田间持水率 (%)。

1.2.7 初始条件 种植时的初始土壤水分 θ_0 ; 作物 i 的第一个生育阶段初的可利用水量, $q_0 = Q_i$ (mm)。

1.2.8 递推方程 本模型是一个含有两个状态变量和一个决策变量的动态规划方程。递推等式如下:

$$F_n^*(q_n, \theta_n) = \max \left[\left(\frac{ET_n}{ET_{nn}} \right)^{\lambda_n} \cdot F_{n+1}^*(q_{n+1}, \theta_{n+1}) \right]$$
$$n = 1, 2, \dots, N-1 \tag{10}$$

$$F_N^*(q_N, \theta_N) = \max \left(\frac{ET_N}{ET_{mN}} \right)^{\lambda_N} \tag{11}$$

式中: $F_{n+1}^*(q_{n+1}, \theta_{n+1})$ ——在状态变量 q_n 和 θ_n 下, 确定灌水量 d_n 时, 余留阶段所得最大相对产量。

运用该模型进行计算, 得出一系列的作物产量和相应的灌溉水量, 将灌溉水量单位由 mm 转化成 m^3 后, 再进一步拟合出作物的水分生产函数。

$$Y_i = a_i \cdot Q_i^2 + b_i \cdot Q_i + c_i \tag{12}$$

式中: Y_i ——作物的单产; a_i, b_i, c_i ——水分生产函数的系数。

1.3 第二层模型——作物种植面积的优化和作物间的配水优化模型

在第一层模型求出单作物水分生产函数的基础上, 本阶段运用非线性优化计算出各种作物的种植面积和灌溉定额。该层模型以灌区各作物净效益之和最大为目标函数, 以各作物的种植面积和灌溉定额为决策变量。

1.3.1 目标函数

$$F = \sum_{i=1}^M (p_i \cdot Y_i - C_i - p_w \cdot Q_i) \cdot x_i \tag{13}$$

式中: p_i ——作物的单价; C_i ——单位面积作物的种子、肥料及劳动力成本; p_w ——水价; x_i ——作物 i 的种植面积。

1.3.2 约束条件

$$(1) \text{产量约束. } Y_i \cdot x_i \geq t \cdot w_i \tag{14}$$

式中: t ——当地人口; w_i ——作物 i 的人均最低需求量。

(2) 面积约束。作物 i 的种植面积不低于最低规划面积 A_i ; 灌区的种植面积不高于有效灌溉面积 A 。

$$x_i \geq A_i \tag{15}$$

$$\sum_{i=1}^M x_i \leq A \tag{16}$$

(3) 灌水量约束。作物 i 的灌溉定额不大于充分灌溉定额 D_i ; 总灌溉水量不大于灌区可用灌溉水量 Q 。

$$Q_i \leq D_i \tag{17}$$

$$\sum_{i=1}^M x_i \cdot Q_i \leq Q \tag{18}$$

2 模型在民勤灌区的应用

2.1 民勤概况

民勤位于甘肃省西北部, 属典型的荒漠绿洲, 生态环境极为脆弱^[6], 干旱少雨, 蒸发强烈, 境内无自产地表水^[7], 全年日照 3 208 h, 平均相对湿度 45%^[8], 多年平均降水量不足 110 mm, 年蒸发量 2 644 mm, 蒸发量是年降水量的 24 倍以上^[9]。从 20 世纪 50 年代以来, 由于石羊河上游的垦区拦蓄引水和对水资源的过度使用, 进入民勤盆地的地表水资源大大减少, 目前尚不足 1 亿 m^3 , 人均水资源占有量不足 300 m^3 , 成为缺水十分严重的地区。为了维持当地工农业用水, 不得不超采地下水, 导致地下水水位持续下降, 致使植被大片死亡, 加速了荒漠化进程。民勤县是以农业为主的地区, 农业用水占了总用水的绝大部分。当前民勤种植结构很不合理, 灌溉水利用率仅为 50% 左右^[10], 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^[4], 因此通过种植结构和灌溉制度的优化来节约水资源对缓解民勤地区缺水矛盾具有重要意义。

2.2 基本资料

选取民勤 8 种主要作物, 根据 1953—2008 年 56 a 的降雨资料, 以 75% 保证率为例计算。

2.2.1 潜在蒸发蒸腾量 根据民勤 75% 保证率代表年(1997 年)代表作物的月平均增发蒸腾量 ET_0 及 8 种主要作物的作物系数 K_c ^[11], 按照各个作物的生育阶段时间^[12]进行累加(式 19), 推算出以下 8 种作物各生育阶段的潜在蒸发蒸腾量(表 1)。

表 1 民勤主要作物各生育阶段的潜在蒸发蒸腾量 mm

白兰瓜		辣椒		棉花		苜蓿		西瓜		小麦		玉米		籽瓜	
生育期	ET_m	生育期	ET_m	生育期	ET_m	生育期	ET_m	生育期	ET_m	生育期	ET_m	生育期	ET_m	生育期	ET_m
播种—开花	65.28	定植—苗期	255.49	播种—现蕾	48.97	返青—分枝	45.72	苗期—伸蔓	115.92	播种—拔节	167.18	麦收—抽穗	73.74	播种—开花	107.83
开花—膨瓜	41.89	苗期—开花坐果	135.12	现蕾—开花	120.34	分枝—现蕾	78.95	伸蔓—开花坐果	89.49	拔节—孕穗	123.47	抽穗—灌浆	160.36	开花—膨瓜	46.38
膨瓜—定型	219.56	开花坐果—盛果期	196.78	开花—吐絮	216.42	现蕾—开花	189.58	开花坐果—生长盛期	108.19	孕穗—抽穗	118.99	灌浆—乳熟	104.73	膨瓜—定型	130.11
定型—成熟	104.07	盛果期—盛果后期	114.64	吐絮—扳杆	21.42	开花初期	68.65	生长盛期—成熟期	130.43	抽穗—灌浆	109.08	乳熟—成熟	68.24	定型—成熟	55.73

$$ET_m = \sum ET_0 \cdot K_c \tag{19}$$

2.2.2 有效降雨量 根据 75% 保证率代表年的日有效降雨量资料及各作物的生育阶段时间推算出 8 种作物各个生育阶段的有效降雨量, 如表 2。

2.2.3 水分敏感指数 据李霆^[12]及康绍忠^[13]等资料得出民勤 8 种主要作物的水分敏感指数见表 3。

2.2.4 作物经济指标 据文献^[13]及现状市场经济信息和实地调查等得出作物的最高产量、单价和单位面积种植成本见表 4。

2.2.5 现状种植面积及灌溉定额 根据武威统计年鉴等资料^[14],民勤 8 种作物的现状种植面积和充分灌溉定额见表 5。

表 2 民勤主要作物各生育阶段的有效降雨量 P_n															mm
白兰瓜		辣椒		棉花		苜蓿		西瓜		小麦		玉米		籽瓜	
生育期	P_n	生育期	P_n	生育期	P_n	生育期	P_n	生育期	P_n	生育期	P_n	生育期	P_n	生育期	P_n
播种—开花	0	定植—苗期	0	播种—现蕾	0	返青—分枝	0	苗期—伸蔓	0	播种—拔节	6.78	麦收—抽穗	17.29	播种—开花	0
开花—膨瓜	0	苗期—开花坐果	0	现蕾—开花	0	分枝—现蕾	0	伸蔓—开花坐果	0	拔节—孕穗	0	抽穗—灌浆	25.15	开花—膨瓜	0
膨瓜—定型	17.29	开花坐果—盛果期	17.29	开花—吐絮	42.44	现蕾—开花	0	开花坐果—生长盛期	0	孕穗—抽穗	0	灌浆—乳熟	6.19	膨瓜—定型	17.29
定型—成熟	25.15	盛果期—盛果后期	25.15	吐絮—扳杆	6.19	开花初期	0	生长盛期—成熟期	17.29	抽穗—灌浆	0	乳熟—成熟	0	定型—成熟	25.15

表 3 民勤主要作物各生育阶段的水分敏感指数 λ															
白兰瓜		辣椒		棉花		苜蓿		西瓜		小麦		玉米		籽瓜	
生育期	λ	生育期	λ	生育期	λ	生育期	λ	生育期	λ	生育期	λ	生育期	λ	生育期	λ
播种—开花	0.169	定植—苗期	0.106	播种—现蕾	0.245	返青—分枝	0	苗期—伸蔓	0.18	播种—拔节	0.061	麦收—抽穗	0.193	播种—开花	0.108
开花—膨瓜	0.265	苗期—开花坐果	0.163	现蕾—开花	0.172	分枝—现蕾	0.7364	伸蔓—开花坐果	0.342	拔节—孕穗	0.345	抽穗—灌浆	0.115	开花—膨瓜	0.062
膨瓜—定型	0.375	开花坐果—盛果期	0.196	开花—吐絮	0.469	现蕾—开花	0.491	开花坐果—生长盛期	0.221	孕穗—抽穗	0.078	灌浆—乳熟	0.005	膨瓜—定型	0.256
定型—成熟	0.033	盛果期—盛果后期	0.228	吐絮—扳杆	0.063	开花初期	0.3589	生长盛期—成熟期	0.467	抽穗—灌浆	0.101	乳熟—成熟	0.1	定型—成熟	0.001

表 4 作物最高产量 Y_m 、单价 P_i 及单位面积种植成本 C_i								
指标	白兰瓜	辣椒	棉花	苜蓿	西瓜	小麦	玉米	籽瓜
最高产量/(kg·hm ⁻²)	51033	17912.5	1530	14700.6	39049	7581	9225	2758.5
单价/(元·kg ⁻¹)	2	7	18	2	1.5	2	1.8	8
种植成本/(元·hm ⁻²)	19500	39900	15000	18000	19500	10500	11250	15000

表 5 现状和优化的作物种植面积及灌溉定额								
指标	白兰瓜	辣椒	棉花	苜蓿	西瓜	小麦	玉米	籽瓜
现状种植面积//hm ²	947	2567	12667	11300	500	15633	6053	5467
现状灌溉定额/(m ³ ·hm ⁻²)	5600	6800	5400	9000	5400	7000	5000	3400
优化种植面积/hm ²	7585	5333	16670	7761	1000	10335	3449	3000
优化灌溉定额/(m ³ ·hm ⁻²)	3852	5223	4000	9000	4130	7000	4037	2000

2.2.6 其它已知资料 在民勤地区,土壤干容重取 1.46 g/cm³,田间持水量为 23%,初始含水量取为 19%,根据《石羊河流域近期重点治理规划》,灌溉水利利用系数取为 0.62,民勤灌溉定额为 5 100~6 150 m³/hm²,本文中定为 350 m³/hm²,农业水价为 0.2 元/m³。现状年民勤县总人口 31.5 万,农业人口 26.44 万,大牲畜 9.65 万头,小牲畜 77 万头,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,10 kg 鲜饲草折合成 1 kg 干苜蓿计算。

根据民勤地区实际情况,为保证本地区不致过度依赖外地粮食,设定人均年需小麦 250 kg,玉米 100 kg,不足的部分需要从外地调入。据民勤辣椒及棉花市场需求,辣椒需 85 741 t,棉花需 20 810 t,其他作物,如西瓜、籽瓜等约束都是根据当地实际情况进行合理的拟定。

2.3 计算结果

优化的作物种植面积和灌溉定额见表 5,优化后的灌溉制度见表 6。

表 6 4 优化后的作物灌溉制度															
白兰瓜		辣椒		棉花		苜蓿		西瓜		小麦		玉米		籽瓜	
生育期	灌水量	生育期	灌水量	生育期	灌水量	生育期	灌水量	生育期	灌水量	生育期	灌水量	生育期	灌水量	生育期	灌水量
播种—开花	1200	定植—苗期	0	播种—现蕾	800	返青—分枝	0	苗期—伸蔓	0	播种—拔节	2600	麦收—抽穗	1000	播种—开花	1400
开花—膨瓜	0	苗期—开花坐果	2200	现蕾—开花	1000	分枝—现蕾	1400	伸蔓—开花坐果	1600	拔节—孕穗	2000	抽穗—灌浆	2200	开花—膨瓜	600
膨瓜—定型	2600	开花坐果—盛果期	1600	开花—吐絮	2200	现蕾—开花	3200	开花坐果—生长盛期	1000	孕穗—抽穗	2000	灌浆—乳熟	800	膨瓜—定型	0
定型—成熟	0	盛果期—盛果后期	1400	吐絮—扳杆	0	开花初期	0	生长盛期—成熟期	1600	抽穗—灌浆	0	乳熟—成熟	0	定型—成熟	0

3 结果分析

3.1 节水分析

现状年(2009 年)民勤农业灌溉用水为 5.02 亿 m³,通过模型优化计算,民勤灌区农业总灌溉用水量

为 2.9 亿 m³,加上民勤灌区泡地用水 0.83 亿 m³,农业用水总量为 3.73 亿 m³,依照优化方案,农业用水可以节约 1.29 亿 m³,占总农业用水量的 25.7%,这对

于水资源极度紧缺的民勤地区具有重大的现实意义。

3.2 经济效益分析

通过表5,可以得出现状年和优化后作物种植面积的对比如图2,白兰瓜、辣椒、棉花、西瓜等种植面积有不同程度的增加,其余作物种植面积都有所减少。民勤地区光照充足,昼夜温差大,有利于瓜果糖分的积累^[15],白兰瓜是民勤传统的瓜类作物,种植技术比较成熟,知名度比较高,经济效益比较好;近年民勤地区温室大棚种植技术发展迅速,其中温室辣椒产业基本形成规模,市场需求及经济效益都很好;棉花的生理特点比较适宜民勤这种降水较少的地区,其品质和产量都比较好,且市场需求较大,故这三种作物种植面积增幅较大。民勤特殊的气候条件,使得民勤西瓜品质比较优良,在原有的基础上面积有所增加。苜蓿耗水量比较大,这与民勤水资源紧缺的现状相矛盾,故在保证本地大小牲畜的基本需求下,种植面积有所减少,小麦、玉米等粮食作物及籽瓜经济效益比较低,在保证当地一定需求的情况下,种植面积降幅较大,粮食不足部分一般由外地调入。

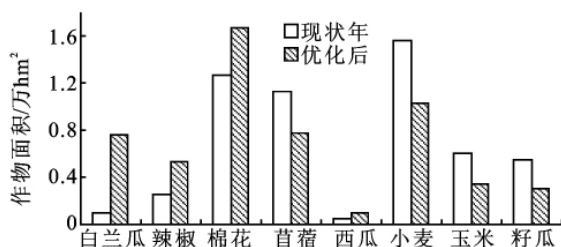


图2 现状年和优化后作物种植面积柱状图

据甘肃经济信息资料,民勤县现状年(2009年)农业总产值为15.94亿元,依据本文种植成本和水价计算出农业净效益为6.55亿元。经模型优化后,农业总产值可达21.93亿元,农业净效益达10.80亿元。与现状年比较,农业总产值增加了5.99亿元,农业净效益增加了4.25亿元,农民人均收入增加1607元。这些数据说明通过应用该模型,扩大了经济规模,大幅提高了农民的收入,这样既推动了当地经济的发展,又使当地农民获得了实惠^[16]。

4 结论

本文依据大系统递阶分析原理,建立了一个同时优化作物种植面积、作物灌溉定额和作物灌溉制度的数学模型,概念明确,求解方便,可降低问题的维数,代表了区域农业灌溉用水优化配置研究的发展方向^[17]。模型的第一层采用动态规划,优化了单作物的灌溉制度,第二层采用非线性优化,优化了灌区各作物的灌溉定额和种植面积,这样既给出了民勤县政府

农业部门的宏观发展规划,又给出了农民具体的灌溉时间和灌水量,适用面比较广。通过模型的应用,不但大量节约了农业用水,而且较大幅度提高了经济效益。

参考文献:

- [1] 石培泽,马金珠.干旱区节水灌溉理论与实践:武威市农业灌溉综合节水科学试验[M].兰州:兰州大学出版社,2004.
- [2] 郭宗楼.灌溉水资源最优分配的DP-DP法[J].水科学进展,1994,5(4):303-308.
- [3] 崔远来,李远华.作物缺水条件下灌溉供水最优分配[J].水利学报,1997,6(3):37-42.
- [4] Shangguan Zhouping, Shao Mingan, Horton Robert. 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.
- [5] 邱林,马建琴,朱普生.区域灌溉水资源优化分配模型及其应用[J].人民黄河,1998,20(9):15-18.
- [6] 潘竟源,刘普幸,孙国军,等.民勤绿洲现代农业发展对策[J].农业现代化研究,2007,28(6):749-752.
- [7] 常兆丰,韩福贵,刘克峰.民勤县节水型农业系统优化模型分析[J].农业系统科学与综合研究,2010,26(2):227-231.
- [8] 张翠芳,牛海山.民勤三项农业节水措施的相对潜力估算[J].农业工程学报,2009,25(10):7-12.
- [9] 安智海,叶静颖.生态环境脆弱地区的旅游开发:以甘肃省民勤县为例[J].资源环境与发展,2009(2):41-45.
- [10] 刘丽霞.民勤绿洲不同节水灌溉模式棉花综合效益研究[J].干旱地区农业研究,2006,24(3):85-88.
- [11] 佟玲.西北干旱内陆区石羊河流域农业耗水对变化环境相应的研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [12] 李霆.石羊河流域主要农作物水分生产函数及优化灌溉制度的初步研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2005.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 王锋,康绍忠,王振昌.甘肃民勤荒漠绿洲区调亏灌溉对西瓜水分利用效率、产量与品质的影响[J].干旱地区农业研究,2007,25(4):123-129.
- [16] 徐万林,栗晓玲.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[J].干旱地区农业研究,2010,28(5):1-5.
- [17] 张长江,徐征和,贫汝安.应用大系统递阶模型优化配置区域农业水资源[J].水利学报,2005,36(12):1480-1485.