

内蒙古中部牧区青贮玉米与苜蓿立体种植灌溉制度优化

郑和祥¹, 赵淑银¹, 郭克贞¹, 刘虎¹, 魏学敏², 贾金良³

(1. 水利部 牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020; 2. 内蒙古农业大学

水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 3. 鄂尔多斯市水利工程局, 内蒙古 东胜 017000)

摘 要:灌溉制度设计与作物种植模式紧密联系,随着现代农业的发展,作物种植模式日益多元化,各种间作、混作和立体种植模式的出现,给优化灌溉制度的制定提出了新的挑战。本文在田间灌溉试验的基础上,引入模拟灌溉制度的 ISAREG 模型研究立体种植模式下的灌溉制度,对青贮玉米与苜蓿立体种植实际灌溉制度的评价表明,其灌水定额和灌水时间均存在不适宜的问题,需要进行优化设计;在验证模型和参数率定的基础上模拟多种灌水方案,得出了青贮玉米与苜蓿立体种植模式下的优化灌溉制度。

关键词:灌溉制度优化; 青贮玉米; 苜蓿; 立体种植

中图分类号:S274.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)04-0086-05

Irrigation Schedule Optimization of Maize and Alfalfa Intercropping in the Middle of Pastoral Area of Inner Mongolia

ZHENG He-xiang¹, ZHAO Shu-yin¹, GUO Ke-zhen¹, LIU Hu¹, WEI Xue-min², JIA Jin-liang³

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources,

Hohhot 010020, China; 2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural

University, Hohhot 010018, China; 3. Water Conservancy Bureau of Ordos, Dongsheng, Inner Mongolia 017000, China)

Abstract: It's necessary to keep on studying irrigation schedule optimization with the development of modern agriculture and emergence the various intercropping, mixed cropping and three-dimensional planting model, and that the relationship between irrigation schedule design and crop planting mode is close. The irrigation schedule of maize and alfalfa intercropping was studied based on irrigation experiment by combination of ISAREG model and planting mode. The actual irrigation schedule of two trial treatments of maize and alfalfa intercropping was appraised, and the result indicated that its irrigation quota and irrigation time were not suitable and the design need to be optimized; on this foundation, the multiple group schemes were designed based on water requirement characteristic of maize and alfalfa intercropping, and optimized irrigation schedule was separately gained.

Key words: irrigation schedule; maize; alfalfa; intercropping

青贮玉米和紫花苜蓿为内蒙古中部牧区最主要的饲草作物。近年来,随着灌溉方式和种植技术的不断提高,青贮玉米和紫花苜蓿立体种植在该地区得到了较大推广,该模式较大幅度地提高了牧草水热利用效率和产量,与此同时新的种植模式要求相适应的灌溉制度,对灌溉制度进行优化设计可以有效地提高水分利用率及作物产量,制定作物灌溉制度不仅要考虑补充根系层土壤水分以满足作物需求,还应考虑种植

模式对灌溉制度的影响^[1-3]。

目前确定作物灌溉制度优化的方法很多,如线性规划法、非线性规划法、动态规划法、随机动态规划法和决策系统等^[4-5]。目前应用较多的是动态规划法,以及动态规划法与遗传算法等人工智能技术结合的算法,动态规划法优化灌溉制度能够较准确地反映真实情况,但其计算工作量较大且易出现早熟及陷入局部最优而难于求得真正最优解的问题。目前,对立体

种植模式的灌溉制度优化研究较少。本文通过引入被国内外广泛认可的具有评价和优化功能的 ISAREG 模型研究灌溉制度与立体种植相结合的灌溉模式^[6-9],结合田间灌溉试验,在验证模型参数的基础上模拟多种灌水方案,综合考虑作物立体种植条件下不同的需水要求,选出适合于青贮玉米与紫花苜蓿立体种植模式下的灌溉制度。

1 试验地概况与试验设计

1.1 试验地点

试验地选在内蒙古草原站育草基地,该基地位于和林县盛乐镇忽通兔村,距离和林县盛乐经济园区 15 km;和林格尔县位于内蒙古自治区中部,是重要的奶源基地,饲草作物种植规模较大。

试验区属中温带大陆性季风气候区,春季干旱多风,夏季炎热短暂,秋季干燥凉爽,冬季寒冷漫长。多年平均降水量 417 mm,多年平均蒸发量 1 850 mm,多年平均相对湿度 49%;多年平均气温 5.6℃,日照时数 2 882 h,最大冻土层深度为 170 cm。平均风速为 2.2 m/s,基本风向为西风。土壤以栗钙土和灰褐土为主,有机质含量 0.96%~1.20%。

1.2 试验材料和方法

试验材料为紫花苜蓿和青贮玉米,选用的品种分别为草原 2 号和科多 4 号。对两种作物进行立体种植,采用田间对比灌溉试验的研究方法,利用 ISAREG 模型对紫花苜蓿和青贮玉米立体种植条件下的实际灌溉制度进行评价,在此基础上进行灌溉模拟,得出紫花苜蓿和青贮玉米立体种植优化灌溉制度。

1.3 试验处理

受旱程度划分:土壤含水率介于作物生长阻滞含水率与田间持水率之间时,作物生长正常;土壤含水率介于凋萎含水率与作物生长阻滞含水率之间时,作物将处于中度受旱状态;当土壤含水率接近凋萎系数时,说明作物严重受旱。该气候和土壤条件下的研究成果表明:青贮玉米适宜土壤水为田间持水量的 70%~90%,当达到田间持水量的 50%时,即达到了中度受旱程度;紫花苜蓿是以土壤水分分为田间持水量的 65%~85%,50%出现中度受旱^[10-13]。

根据优化的立体种植规格^[14],小区宽度设计为 8.1 m,长度为 10.0 m,面积为 81 m²。青贮玉米带宽 1.6 m,4 行种植,行距 0.4 m;紫花苜蓿带宽 2.45 m,7 行种植,行距 0.35 m。试验以青贮玉米和苜蓿中度受旱试验设两个处理,每个处理重复 3 次,共设置 6 个试验小区。

6 个试验小区的根系层土壤类型相同,均分为两

层,上层 0—40 cm 为粉壤土,土壤容重 1.43 g/cm³,下层 40—100 cm 为粉土,土壤容重 1.40 g/cm³;土壤含水率采用取土烘干法测定,并用该数据进行水量平衡验证。

2 ISAREG 模型概述

2.1 模型的原理

ISAREG 模型是葡萄牙里斯本技术大学农学院开发的灌溉模型,它具有概念明确、模拟精度高、易于操作且功能多的特点,对评价现有灌溉制度,制定优化灌溉制度具有指导作用。ISAREG 模型的主要功能是模拟农田土壤水分的变化,从而评价给定的灌溉制度,计算作物需水量和灌溉需水量,也可通过不同灌水方案的模拟对比,制定优化灌溉制度^[12-13]。该模型考虑了:(1) 作物根系吸水深度的变化;(2) 非均质土层的影响;(3) 不同深度地下水水位的影响;(4) 作物受旱时土壤供水能力对腾发量的影响。

ISAREG 模型以水量平衡原理为基础,采用的水量平衡方程为:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \frac{P_i + I_{ni} - ET_{ai} - DP_i + GW_i}{100z_{ri}} \quad (1)$$

式中: θ_i, θ_{i-1} ——第 $i, i-1$ 天根系层的土壤含水率(%); P_i ——第 i 天的有效降雨量(mm); I_{ni} ——第 i 天的净灌水量(mm); ET_{ai} ——第 i 天的作物实际腾发量(mm); DP_i ——第 i 天的深层渗漏量(mm); GW_i ——第 i 天的地下水补给量(mm); z_{ri} ——第 i 天的根系层深度(m)。

2.2 模型的数据结构

模型的主要输入数据分为 7 类:(1) 气象数据:包括有效降雨量 P_e 、参考作物腾发量 ET_0 和它的各项常规气象数据等;(2) 作物数据:包括作物类型、作物生育期、计划湿润层深度、实效水可利用系数 p 、作物系数 K_c 、产量反应系数 K_y 等;(3) 土壤数据:包括土壤类型、每层的土壤深度 d 、田间持水率 θ_{FC} 、凋萎点 θ_{WP} 等;(4) 地下水数据:包括地下水补给量 GW 和深层渗漏量 DP ;(5) 灌溉数据:根据不同的模拟类型输入初始土壤储水率、灌水日期、灌水定额和灌水达到的土壤含水率范围以及灌水的各种约束条件等;(6) 水量数据:包括灌水时间间隔和可供水量等;(7) 验证数据:为实测田间含水率^[15-18]。

模型的输出数据根据模拟输入选项的差异有所不同,主要包括:灌溉定额、灌水定额、灌水时间、灌水次数、深层渗漏量、水分利用效率、最大腾发量、实际腾发量、水分胁迫时的减产率、模拟含水率与田间数据的对比等。

3 模型参数计算和验证

3.1 参考作物腾发量 ET_0

参考作物腾发量 ET_0 采用 Penman-Monteith 方法计算。本文根据 2011 年观测的气象数据计算得到青贮玉米与紫花苜蓿立体种植全生育期的逐日 ET_0 。

3.2 作物系数 K_c

作物系数 K_c 是根据参照作物腾发量计算实际作物需水量的重要参数。青贮玉米与紫花苜蓿立体种植的作物系数分两步计算,首先采用 FAO-56 推荐的分段单值平均法计算青贮玉米与紫花苜蓿单作时的作物系数,根据 FAO-56 给出的标准条件下不同生育阶段的作物系数^[17-19],结合当地气候、土壤条件调整各生育阶段的作物系数 K_c ;然后计算两种作物立体种植时的综合作物系数 $K_{c(\text{field})}$ 。综合作物系数是根据两种作物的种植比率 f 和作物高度 h 结合两种作物的权重来确定的,计算公式为:

$$K_{c(\text{field})} = \frac{f_1 h_1 k_{c1} + f_2 h_2 k_{c2}}{f_1 h_1 + f_2 h_2} \quad (2)$$

式中: $K_{c(\text{field})}$ ——综合作物系数; f_1, f_2 ——两种作物的种植比例; h_1, h_2 ——两种作物的高度(m); k_{c1}, k_{c2} ——两种作物的作物系数。

采用上述步骤计算青贮玉米与紫花苜蓿立体种植的综合作物系数时,由于两种作物的种植日期、各生育阶段划分、生育期长短、收获期均不相同,应重新进行生育阶段组合,根据青贮玉米与紫花苜蓿的生长特点划分为 6 个阶段:苜蓿第一茬生育前期青贮玉米还未播种,因此生育前期综合作物系数即为苜蓿单作时的作物系数,苜蓿第一茬生育中期基本上对应于青贮玉米的生育前期,苜蓿第一茬生育后期对应于青贮玉米生育中期的前半阶段,苜蓿第二茬生育前期对应于青贮玉米生育中期的后半阶段,苜蓿第二茬生育中期对应于青贮玉米生育后期的前半阶段,苜蓿第二茬生育后期对应于青贮玉米生育后期的后半阶段(表 1)。

表 1 立体种植综合作物系数

作物系数	K_{c1}	K_{c2}	K_{c3}	K_{c4}	K_{c5}	K_{c6}
立体种植	0.40	0.85	1.20	0.80	0.90	0.88

3.3 产量反应系数 K_y

单一作物产量反应系数 K_y 采用以下公式进行计算:

$$K_y = (1 - \frac{Y_a}{Y_m}) / (1 - \frac{ET_a}{ET_m}) \quad (3)$$

式中: Y_a ——作物实际产量(kg/hm^2); Y_m ——作物最大产量(kg/hm^2); ET_a ——作物实际腾发量

(mm); ET_m ——作物最大腾发量(mm)。模拟时采用的水分生产函数的产量反应系数 K_y 为 FAO-56 推荐值,不同的作物有不同的产量反应系数^[20]。青贮玉米与紫花苜蓿立体种植时的产量反应系数采用综合产量反应系数,计算公式为:

$$K_{y(\text{field})} = \frac{f_1 Y_{m1} K_{y1} + f_2 Y_{m2} K_{y2}}{f_1 Y_{m1} + f_2 Y_{m2}} \quad (4)$$

式中: $K_{y(\text{field})}$ ——综合产量反应系数; Y_{m1}, Y_{m2} ——两种作物的最大产量(kg/hm^2)。

FAO-56 推荐的苜蓿产量反应系数为 1.10,青贮玉米产量反应系数为 1.25,根据不同作物立体种植比例和对应的最大产量计算得到青贮玉米与苜蓿立体种植的综合产量反应系数为 1.18。

3.4 模型参数验证

根系层土壤平均含水量可能处于 3 个不同区域:过量含水区, $\theta_s \geq \theta > \theta_{FC}$,此时由于有重力排水,土壤含水量不能为作物即时利用,但部分可作为深层储水为作物后期所利用;实效含水量区, $\theta_{FC} \geq \theta \geq \theta_{OYT}$,该区的土壤含水量可为作物即时利用,且能使作物保持最大腾发量,故称为最优产量区或适宜含水率区域;水分亏缺区, $\theta_{OYT} > \theta \geq \theta_{WP}$,此时作物因受旱而不能达到最大腾发量,作物产量下降。

根据上述选定的各项参数进行灌溉模拟,图 1 为 2011 年青贮玉米与紫花苜蓿立体种植两个处理整个生育期的土壤含水率动态模拟结果与田间实测含水率值的对比。两个处理模拟含水率的相对误差均在 8.00% 以内,相对误差的平均值为 3.7%,可以满足模拟精度要求。表明该模型模拟青贮玉米与紫花苜蓿立体种植选用的土壤、气象、降雨和作物等各方面的参数较适合,可以用该模型的各参数评价青贮玉米与紫花苜蓿立体种植的各种灌溉设计方案,并对灌溉制度进行优化。

4 青贮玉米与苜蓿立体种植灌溉制度方案设计和优选

4.1 灌溉制度方案设计

对现状实际灌溉制度观测数据的分析得出:不适宜的灌水日期和灌水定额使得青贮玉米和苜蓿立体种植条件下水分利用效率和产量没有达到最理想状态。首先是由于不适宜的灌水日期,实际灌溉制度在土壤含水率降低至适宜含水率以下,甚至达到凋萎点时仍未进行灌水,造成了产量降低;其次是含水率未降低至适宜含水率时进行了灌水,导致灌水次数增加,降低了水分利用效率;再者是每次的灌水定额有时灌至田间持水率以上,有时则未灌至田间持水量,

导致水分利用效率较低,产量未达最高水平,因此需对实际灌溉制度进行调整和优化。根据研究区的现状和实际灌溉制度评价结果设计青贮玉米与苜蓿立

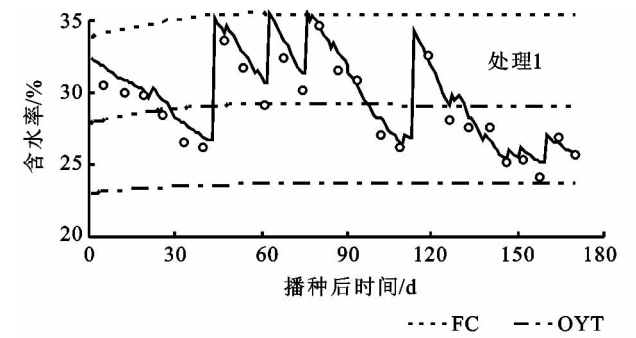
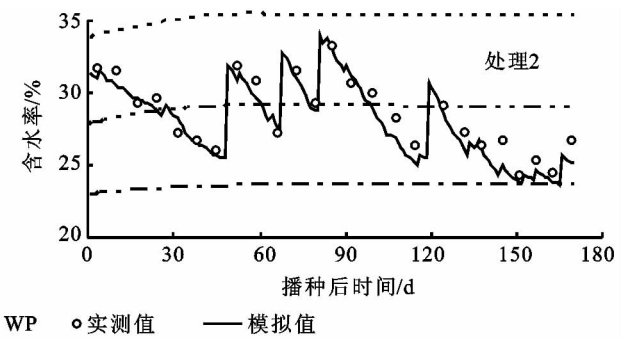


图 1 青贮玉米与紫花苜蓿立体种植土壤含水率模拟值与实测值对比

方案Ⅰ:以产量最大为目标,当根系层土壤平均含水率降至适宜含水率下限时即实施灌溉,灌水量为补充根系层土壤水分至田间持水量时所需要的水量。方案Ⅱ:根据土壤含水率确定灌水日期,当根系层土壤平均含水率降至适宜含水率下限时即实施灌溉,灌水量为补充根系层土壤水分至有效含水率的 90%时所需要的水量。方案Ⅲ:根据土壤含水率确定灌水日期,当根系层土壤平均含水率降至适宜含水率下限的 90%时实施灌溉,灌水量为补充根系层土壤水分至田间持水量所需要的水量。方案Ⅳ:根据土壤含水率确定灌水日期,当根系层土壤平均含水率降至适宜含水率下限的 80%时实施灌溉,灌水量为补充根系层土

体种植灌溉制度方案,通过对各种方案进行多次组合模拟,在保证产量下降率较小,一般在 10.0% 以下,初步筛选出下述 6 种典型方案进行分析:



壤水分至田间持水量所需要的水量。方案Ⅴ:给定灌水定额,根据青贮玉米和苜蓿田间持水量与适宜含水量下限的差约为 65 mm,本方案采用的灌水定额为 59 mm,每次灌水时间由模型进行优化计算给出。方案Ⅵ:给定灌水定额,采用方案Ⅴ灌水定额的 90.0%,即每次灌水量均为 54 mm,每次灌水时间由模型进行优化计算给出。

对上述方案进行模拟时,根系层土壤初始储水量采用青贮玉米播种前根系层土壤的有效储水量,土壤初始土壤含水率约在 32.0% 左右。表 2 给出了青贮玉米与苜蓿立体种植各灌溉制度方案的模拟结果。分析表 2 中 6 种灌溉制度方案的模拟输出结果可以得出:

表 2 青贮玉米与苜蓿立体种植灌溉制度方案设计模拟结果对比

试验处理	灌溉定额/mm	灌水次数/次	渗漏量/mm	补给量/mm	ET _a /mm	产量下降率/%
方案Ⅰ	452.6	7	0.00	0.00	612.82	0.00
方案Ⅱ	435.1	8	11.84	2.52	602.47	0.42
方案Ⅲ	382.4	6	0.00	12.95	581.94	4.52
方案Ⅳ	337.3	6	0.00	9.84	572.30	3.15
方案Ⅴ	390.0	6	2.94	15.97	568.72	6.97
方案Ⅵ	413.0	7	5.29	10.05	580.17	4.28

方案Ⅰ生育期需灌水 7 次,需要的总灌水量多,实际腾发量达到最大腾发量的值;该方案在整个生育期结束时土壤储水量较小,其土壤含水率基本达到适宜含水率下限;作物在整个生育期均未受水分胁迫,无受旱减产。

方案Ⅱ至方案Ⅳ均是根据土壤含水率确定灌水日期。从输出结果可以看出,方案Ⅱ生育期需灌水 8 次,增大了输水损失,与方案Ⅰ相比,减少了每次的灌水定额,总灌水量也略有减少,但土壤含水率基本保持在适宜含水率范围,仅在生育期结束时,降至适宜含水率以下,对产量的影响很小,产量下降率仅为 0.42%。

方案Ⅲ与方案Ⅰ和Ⅱ相比,不但总灌水量大幅度

降低,而且只需灌水 6 次,减少了 1~2 次灌水,降低了输水损失;由于该时期正是玉米的需水敏感期,因此造成产量的显著下降,产量下降率为 4.52%。

方案Ⅳ生育期需灌水 6 次,每次灌水均是在土壤含水率降至适宜含水率下限的 80% 时才开始灌溉,与方案Ⅲ相比,每次的灌水定额增大,生育期总灌水量也增大了,虽然在玉米生育后期的土壤含水率均在适宜含水率范围,在整个生育期结束时土壤储水量比方案Ⅲ大,但对产量的影响相对较小,产量下降率为 3.15%。

方案Ⅴ与方案Ⅵ均是给定固定的灌水定额,模型根据土壤适宜含水率下限计算得出灌水日期,方案Ⅴ灌水次数为 6 次,方案Ⅵ灌水次数为 7 次。方案Ⅴ与

方案Ⅵ均产生了深层渗漏,但补给量也较大;两个方案的产量下降率均较大,分别为 6.97%和 4.28%。

根据上述 6 种方案的输出结果,在综合考虑总灌水量、灌水次数、渗漏量、补给量和产量下降率的情况下,得出平水年($P=50\%$)青贮玉米与苜蓿立体种植灌溉制度的较优选方案为:方案Ⅳ,其灌溉制度见表 3。

表 3 青贮玉米与苜蓿立体种植优选灌溉制度

灌水		方案Ⅳ	
次数	灌水日期(月-日)	灌水定额/mm	灌溉定额/mm
1	04-29	57.6	337.3
2	05-28	58.2	
3	06-19	55.4	
4	07-05	53.5	
5	07-31	56.7	
6	08-22	55.9	

5 结论

(1) 对 ISAREG 模型模拟青贮玉米与苜蓿立体种植灌溉制度时的各项参数进行了预处理和验证,分别对青贮玉米与苜蓿立体种植两个试验处理的实际灌溉制度进行了评价,各处理的灌水定额和灌水时间均存在不适宜的问题,需要进行优化设计。

(2) 采用 ISAREG 模型,根据青贮玉米与苜蓿立体种植的需水要求进行了充分灌溉和非充分灌溉的多组合方案设计,得到了青贮玉米与苜蓿立体种植的优选灌溉制度。

参考文献:

[1] 徐万林,粟晓玲,史银军,等.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[J].水土保持研究,2011,18(1):205-209.

[2] 潘占兵,张龙,杨瑞,等.黄土高原土壤旱化研究综述[J].水土保持研究,2012,19(6):210-215.

[3] 刘钰,Pereira L S.考虑地面灌水技术制约的灌溉制度优化[J].农业工程学报,2003,19(4):74-78.

[4] 郑和祥,史海滨,郭克贞,等.不同灌水参数组合时田面坡度对灌水质量的影响研究[J].干旱地区农业研究,2011,29(6):43-48.

[5] 石贵余,张金宏.河套灌区灌溉制度研究[J].灌溉排水学报,2003,22(5):72-76.

[6] Fernando R M, Pereira L S, Liu Y. Simulation of Capil-

lary Rise and Deeper Collation with ISAREG[C]. InformationTechnology for Agriculture, ICAST, Ministry of Scienceand Technology, Beijing, China, 2001:421-426.

[7] Pereira L S, Teodoro P R, Rodrigues P N. Irrigation Scheduling Simulation;the Model ISAREG[M]. Netherlands;Kluwer Academic Publishers,2001.

[8] De Costa W A J M, Shammugathan K N. Physiology of yield determination of soybean (*Glycine max* L. Merr.) under different irrigation regimes in the sub-humid zone of Sri Lanka[J]. Field Crops Res.,2002,75(1):23-35.

[9] Hiroki O, Toshiyuki T, Keiji T. Micro net eorogical model for estimate in evaporation from a bare field in the Hetao Irrigation District in the Yellow River Basin[J]. J. Agric. Meteorol,2005,60(5):541-544.

[10] 武开福.基于灰色关联度与 BP 神经网络模型的日参考作物腾发量预测[J].水土保持研究,2011,18(2):237-240.

[11] 龙会英,郑益兴,张燕平,等.元谋干热河谷辣木人工林地灌水后不同覆盖措施对土壤水分及辣木物候的影响[J].水土保持研究,2011,18(1):232-235.

[12] 尚松浩.作物非充分灌溉制度的模拟优化方法[J].清华大学学报,2005,(9):1179-1183.

[13] 付强,王立坤,门宝辉,等.推求水稻非充分灌溉下优化灌溉制度的新方法[J].水利学报,2003(1):123-128.

[14] 郑和祥,史海滨,朱敏,等.平地缩块改造小麦畦田技术研究[J].灌溉排水学报,2011,30(2):79-81.

[15] 王晶,朱清科,刘中奇,等.黄土丘陵区不同林地土壤水分动态变化[J].水土保持研究,2011,18(1):220-223.

[16] 胡顺军,潘渝,康绍忠,等. Penman-Monteith 与 Penman 修正式计算塔里木盆地参考作物潜在腾发量比较[J].农业工程学报,2005,21(6):30-35.

[17] 刘增进,李宝萍,李远华,等.冬小麦水分利用效率与最优灌溉制度的研究[J].农业工程学报,2004,20(4):58-63.

[18] 丁日升,康绍忠,冯绍元,等.缺水条件下非充分灌溉制度预报系统的研制[J].干旱地区农业研究,2006,24(2):79-75.

[19] 郭克贞,李和平,史海滨,等.毛乌素沙地饲草料作物耗水量与节水灌溉制度优化研究[J].灌溉排水学报,2005,24(1):24-27.

[20] 汤广民,王友贞.安徽淮北平原主要农作物的优化灌溉制度与经济灌溉定额[J].灌溉排水学报,2006,25(2):24-29.