

农田灌溉雨水集蓄系统设计研究^{*}

张新燕,蔡焕杰,王 健,程冬玲

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 在分析雨水集蓄系统基本原理和计算方法的基础上,构建了包括降水序列分析子系统、集水量分析计算子系统、蓄水设施优化设计子系统、灌溉水量优化分配模型子系统和经济模型的农田灌溉雨水集蓄系统,并以陕西省礼泉县北部丘陵区为例,采用该系统对大田作物(小麦、玉米)雨水集蓄灌溉利用问题进行了分析,结果证明该系统具有一定的实用性。

[关键词] 农田灌溉;雨水集蓄;系统设计

[中图分类号] S275.2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2004)12-0091-04

近年来,随着水源危机的加剧,雨水资源化已成为人们研究的热点,集蓄雨水进行农业灌溉成为雨水资源利用的重要途径之一。目前,国内外关于雨水集蓄灌溉利用系统设计的研究较少,且已有研究均是针对某地具体特点所构建的,不具有通用性^[1~4]。本研究对利用不同处理的集水区进行集水用于大田作物(冬小麦、玉米)灌溉的一般问题,进行了系统设计,以期对雨水集蓄灌溉利用系统的规划设计提供一个具有通用性和实用性的思路和方法。

1 系统设计

雨水集蓄灌溉利用是用特别处理过的集水区收集雨水径流,将其送入蓄水设施中予以储存,最后进行灌溉利用的过程。整个系统主要由集水区、蓄水设施和灌溉利用区 3 部分组成。其设计就是充分利用降水量及其径流集蓄量,使整个系统的投入产出效益最大,使整个系统的降水量、集水量、蓄水量和用水量能够实现最优配合,从而使灌溉利用产生的效益与投入费用之差即净效益最大。

1.1 基本原理

对某一特定区域,在降水条件及集水区和灌溉区总面积也一定的条件下,集水区和灌溉区面积的相对大小,对系统的投入、产出和蓄水设施的配置,乃至对整个系统的最终效益都有很大的影响。仅就系统的总产出而言,灌溉区的面积和单位面积的产量决定了总产出的多少,集水区面积越大,越有利于

充分拦蓄降水,可用以灌溉的水量也就越多,但灌溉区的面积势必相对减少;反之,集水区面积越小,虽能够增加灌溉区的面积,但可灌水量的减少又不利于灌溉区单产的提高。系统优化模式需要解决的核心问题就是要确定集水区面积和灌溉区面积的最优比例及与之相适应的蓄水设施(包括有效容积、个数和复蓄次数)及灌溉制度的最优组合。

1.2 系统构建

由以上分析可以看出,系统主要包括以下 4 个子系统。

(1)降水序列分析子系统。降水资料是整个系统的基础输入,在此模块中,可根据多年实际降水资料,利用水文频率分析、随机模拟等原理与方法,取得一定设计频率下的年降水量、逐月降水量和逐日降水量等信息。

(2)集水量分析计算子系统。依据降水信息,通过分析影响集水量的各种因素,根据水量平衡原理计算确定集水量。

(3)灌溉水量优化分配子系统。在非充分灌溉条件下,根据土壤水量平衡,利用作物水分生产函数的阶段模型,预测缺水对作物的影响,采用双层动态规划(DP-DP)迭代法^[5]建立灌溉水量优化分配模型:第一层为单项作物灌溉制度优化模型,由土壤水量平衡和作物水分生产函数模型,利用动态规划原理分析建立;第二层为多种作物之间的水量优化分配模型,根据水量平衡和全生育期水分生产函数分析建立。

* [收稿日期] 2004-02-18

[基金项目] 中华农业科教基金“降雨聚集与节水农业技术研究”课题(97-01-03)

[作者简介] 张新燕(1972-),女,河南开封人,讲师,在读博士,主要从事节水灌溉研究。

(4) 蓄水设施优化设计子系统。研究蓄水设施的优化设计,确定出一定蓄水量下蓄水设施个数、容积及复蓄次数的优化组合。在集水量获得模型和灌溉决策规划的基础上,利用蓄水设施水量平衡和调蓄原理等进行蓄水设施优化,建立蓄水设施优化模型。

通过上述子系统的建立及运行,即可得到降水量、集水量、蓄水设施和灌溉用水的基本信息,进一步引入经济指标(系统经济投入产出效益),即可构建系统优化经济模型,依据目标函数进行系统优化设计。

系统设计原理流程框图如图 1 所示。

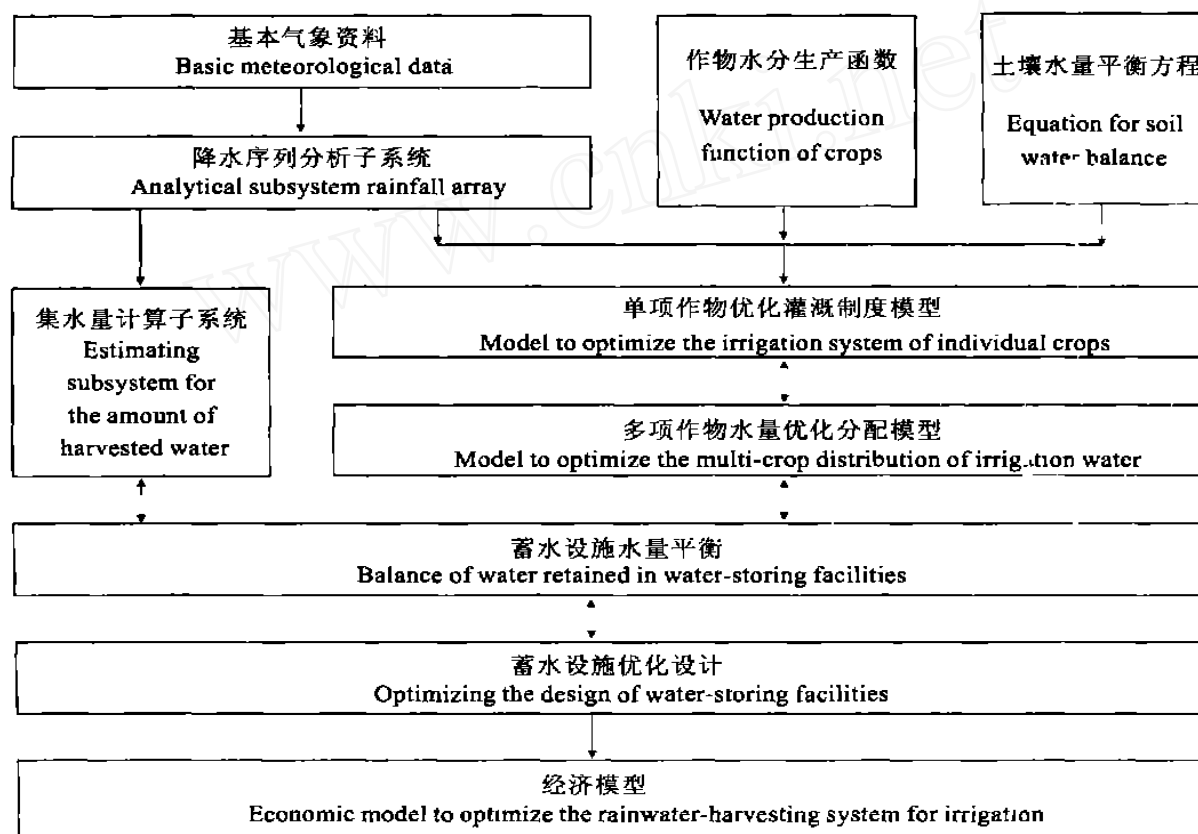


图 1 系统设计原理流程图

Fig. 1 The operational chart of the designing for fundamentals rainwater-harvesting system of irrigation

2 典型系统设计与结果分析

以陕西礼泉北部丘陵沟壑区为例,进行典型系统设计。

2.1 概况

礼泉县位于咸阳中西部,属渭河平原和渭北黄土台塬区,暖温带半干旱大陆性季风气候,年平均降水量 537 mm,降雨多集中在 6~9 月,约占全年降水量的 65%,且多以暴雨形式发生。北部属高原丘陵沟壑区,以农业为主,人均占有水量仅 43 m³ 左右,农业用地以旱地为主,有效灌溉面积仅占全县的 0.74%,人均收入不足 300 元。

2.2 系统设计

系统设计时,根据实际情况作了 2 项假设:一是

根据集流特点,集流面积不能过大,否则大大影响集流效率。从经济性、方便性、易于管理和实施灌溉等方面综合考虑,假定单窖灌溉面积不超过 0.33 hm²。二是根据当地具体情况和窑窖本身特点以及维护管理等实际,假定单窖容积不超过 100 m³。

2.2.1 系统投入构成及计算 集水费用 θ_T 。不同材料处理的集水面,其造价与使用年限以及管理运行费均不同(表 1)^[6]。

(1) 蓄水费用 ψ_T 。蓄水设施费用可表示为其表面积(或容积)的函数。设计采用《甘肃省雨水集蓄利用工程技术标准》中的水泥砂浆抹面窑窖形式。依据国家工程预算标准,计算得出蓄水主体总费用为窖容 V 的函数,即

$$\psi_T = 1.078 \cdot V + 3.49$$

表 1 集流面的集流效率及造价^[6]

Table 1 Costs and efficiency of rainwater-harvesting locations surfaced with different materials^[6]

集流面 Materials used to surface the rainwater- harvesting locations	集流效率 Rainwater- harvesting efficiencies	造价/ (元·m ⁻²) Construction costs	使用年限 Service life	年运行费占 造价的百分比/% Percentages of operational cost to total construction cost	(使用期造价 + 运行费)/ (元·m ⁻²) Construction costs + operational costs
机瓦 Machine-made tile	0.90	3.98	25	2	5.97
水泥瓦 Cement tile	0.90	4.96	25	2	7.44
混凝土 Concrete	0.95	4.82	20	3	7.71
小青瓦 Small blue baked tile	0.75	3.00	20	3	4.80
水泥土 Cement earth	0.85	3.64	15	4	5.82
黄土夯实 Rammed earth	0.65	0.25	4	20	0.45
塑膜覆砂 Sand mulching film	0.80	1.94	10	8	3.49
原坡面 Natural slope lands	0.40	-	-	-	-

(2)辅助设施费用和维修管理运行费。按蓄水主体费用的 15 %和 5 %计入。

(3)灌溉利用系统的费用 φ_T 。按滴灌系统设计。滴灌系统一次性投资 9 000 元/hm²,使用寿命为 15 年,年运行费占投资的 10 %,则

$$\varphi_T = 660 \text{ 元/ (hm}^2 \cdot \text{年)}$$

2.2.2 系统产出计算 灌溉产值的计算公式为

$$Y = Y_{\text{灌}} - Y_{\text{不灌}} = (Y_a' - Y_a) \cdot P_r$$

式中, Y 为灌溉产值; Y_a' 为利用集蓄雨水进行灌溉后的产量,由灌溉水量优化分配模型确定,其值 $Y_a' = Y_m \cdot F$,其中 Y_m 为潜在产量, F 为实际产量与潜

在产量的比值; Y_a 为未灌溉时的产量; P_r 为作物单价。

2.2.3 目标函数 纯收益 $NR = \text{Max}\{ Y - (\theta_T + \psi_T + \varphi_T) \}$

2.3 结果分析

根据以上计算方法和步骤,进行系统优化设计,可得出不同集水面在不同集灌水量下的纯收益,其结果列于表 2。由表 2 可以看出,在集水面确定的条件下,集灌水量不同,纯收益不同,纯收益随集灌水量的增加呈先上升后下降的趋势。纯收益最大值所对应的集灌水量即为该集水面最适集灌水量。

表 2 不同集灌水量下不同集水面的纯收益优化结果

Table 2 Net returns at different amounts of irrigation water collection through the optimization

元/hm²

集流面 Materials used to surface the rainwater- harvesting locations	集水量/mm Amount of irrigation water collection									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
机瓦 Machine-made tile	2 168	2 351	2 598	2 867	3 125	3 320	3 437	3 473	3 467	3 445
水泥瓦 Cement tile	2 146	2 308	2 536	2 787	3 029	3 208	3 311	3 332	3 314	3 280
混凝土 Concrete	2 135	2 287	2 507	2 752	2 988	3 162	3 260	3 277	3 252	3 213
小青瓦 Small blue baked tile	2 095	2 208	2 387	2 590	2 784	2 918	2 981	2 967	2 917	2 855
水泥土 Cement earth	2 087	2 194	2 370	2 572	2 766	2 901	2 964	2 948	2 894	2 828
黄土夯实 Rammed earth	2 094	2 205	2 380	2 576	2 762	2 888	2 945	2 928	2 877	2 815
塑膜覆砂 Sand mulching film	2 076	2 172	2 337	2 528	2 712	2 836	2 889	2 865	2 806	2 734
原坡面 Natural slope lands	1 924	1 884	1 918	1 981	2 041	2 056	2 019	1 927	1 815	1 702

各种集水面在相应最适集灌水量下的纯收益及有关技术指标优化结果如表 3 所示。由表 3 可见,集水面不同,集灌水量、集灌面积比值、总产值、单窖窖容、单窖灌溉面积、系统年成本及纯收益均不同;

最大纯收益对应的集水面为机瓦,其余依次为水泥瓦、混凝土、小青瓦、水泥土、黄土夯实、塑膜覆砂和原坡面。

表 3 最适集灌水量下集水面优化结果

Table 3 The results of the optimization at optimal amount of collection-irrigation water

集流面 Materials used to surface the rainwater- harvesting locations	集灌水量/ m^3 Amounts of collection- irrigation water	集灌面积比值 Ratio of water- harvesting area to irri- gation area	总产值/ (元 $\cdot \text{hm}^{-2}$) Total net production value	单窖容量/ m^3 Capacity per cellar	单窖灌溉 面积/ hm^2 Irrigation area per cellar	系统年成本/ (元 $\cdot \text{hm}^{-2}$) Annual system cost	纯收益/ (元 $\cdot \text{hm}^{-2}$) Net returns
机瓦 Machine-made tile	80	0.31	5 440	100	0.095 3	1 967	3 473
水泥瓦 Cement tile	80	0.31	5 440	100	0.095 3	2 108	3 332
混凝土 Concrete	80	0.30	5 575	100	0.095 3	2 298	3 277
小青瓦 Small blue baked tile	70	0.33	4 846	100	0.109 3	1 865	2 981
水泥土 Cement earth	70	0.29	5 146	100	0.109 3	2 184	2 963
黄土夯实 Rammed earth	70	0.38	4 478	100	0.109 3	1 533	2 945
塑膜覆砂 Sand mulching film	70	0.31	5 003	100	0.109 3	2 114	2 889
原坡面 Natural slope lands	60	0.53	3 064	100	0.127 3	1 008	2 056

结合各个子系统所建立的模型及优化结果,即可得出与最佳集水面——机瓦所对应的一系列优化结果。在集水子系统中,采用机瓦集水面,集流效率均值为 90 %,平均年集水量 343.9 mm,每 hm^2 灌溉面积需 0.31 hm^2 的集水区;蓄水子系统中,选用水泥砂浆抹面窑窖,窖容 100 m^3 ,每窖可灌 0.095 3 hm^2 农田,复蓄次数达 1.26;用水子系统中,采用滴灌系统进行灌溉,最优供水量 1 200 m^3/hm^2 。由系统投入、产出分析计算,系统年均灌溉产值为 5 440 元/ hm^2 ,年均成本为 1 967 元/ hm^2 ,最终年均纯收益为 3 473 元/ hm^2 。

3 讨 论

尽管本文子系统和总系统设计的理论基础和方法依据可靠,但系统具体采用的基础数据和参数具有地区特点,因而,所得出的结论仅能够应用于特定地区,但所提出的系统优化方法具有一定的普遍性。在某一特定地区,只要提供相应基础数据和基本参数,即可应用本研究进行系统优化设计,得出施工

程的优化设计方案。由于系统优化的目的在于依据微观理论解决宏观问题,涉及的有关数据、参数和问题十分庞杂,因此,本研究仅是对大田作物灌溉雨水集蓄利用系统优化设计的初步探讨,重在理论分析和建模,实例分析仅具有方法运用的参考价值。

另外在研究过程中发现,有许多与本研究项目有关的问题仍需要进一步分析和探讨:集水面材料及其集水性能。现有的一些集水面材料投资成本太高,对大田作物来说投资回收期过长,如混凝土;有的管理维护不方便,如机瓦、水泥瓦等。因此,极需研究一些实用而廉价的集水材料用于大田作物集水灌溉。需要进一步深入研究多层次、多形式组合的系统优化模式。随着技术和经济发展的需要,雨水集蓄利用工程也需向横向、纵深发展。应采用多种形式、多种层次相互配合的系统模式,如可根据实际情况采用多种集水方式、灌溉方法,也可采用多种蓄水设施联合及经济作物和大田作物共同灌溉等组合模式。

[参考文献]

[1] Sushil, Pandel. The economy of water harvesting and supplemental irrigation in the semi-arid tropical of India[J]. Agriculture System, 1991, 36 (2): 34 - 41.

[2] 林性粹, 译. 印度半干旱热带地区径流集蓄与补充灌溉的经济性[J]. 灌溉排水, 1992, 11(2): 23 - 26.

[3] 陈智汉, 冉大川. 黄土高原地区坡地雨洪径流优化集存技术: 池窖联蓄系统研究初报[J]. 水土保持研究, 1998, 5(4): 36 - 39; 72.

[4] 陈智汉, 冉大川. 黄土高原地区池窖联蓄系统技术研究[J]. 人民黄河, 2003, 25(1): 16 - 17; 21.

[5] 刘肇伟, 主编. 灌排系统优化方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.

[6] 张光辉, 陈致汉. 雨水集流用水窖的主要类型及其效益[J]. 水土保持通报, 1997, 17(6): 57 - 61.

(下转第 99 页)

- [2] 张忠苗. 软土地基大直径桩受力性状与桩端注浆新技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,2001. 23 - 29.
- [3] 丁翠红,顾建文,王心键. 某基坑事故工程桩和基础承台的加固处理[J]. 建筑结构,2004,34(3):21 - 22.
- [4] 陈钟祥,刘慈群. 双重孔隙介质中二相驱替理论[J]. 力学学报,1980,12(2):152 - 165.
- [5] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 北京:中国科学技术大学出版社,1999. 310 - 322.
- [6] 仵彦卿. 岩体渗流场与应力场耦合的双重介质模型[J]. 水文地质工程地质,1998,(1):43 - 46.
- [7] Helm D C. Horizontal aquifer movement in a Theis- Theim confined system[J]. Water Resources Research,1994,30:953 - 964.
- [8] Chen C,Pei S,Jiao J. Land subsidence caused by groundwater exploitation in Suzhou City,China[J]. Hydrogeology Journal,2003,11:275 - 287.

Seepage analysis and engineering application of high pressure injection of cement liquid

ZHANG Jian-shan^{1,3}, WU Yan-qing², LI Zhe¹

(1 College of Water Resource and Hydroelectricity, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 College of Environment Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

3 Institute of Geotechnical Investigation & Design, Xi'an, Shaanxi 710043, China)

Abstract :Based on the mathematic model of the high pressure injection of cement liquid ,the formula of pressure distribution was presented in the district with the cement liquid injection and the raw water area ,and the pressure in well bottom to fade away when stopping injection cement liquid. The correlation between the pressure in well bottom and the time of the injection ,the viscosity of cement liquid ,the permeability in the confined aquifer. The empirical formula of the injection pressure with ratio of water to cement was established. Application of the formula consequently guided the engineering ,and obtained good fulfillment result.

Key words :high pressure injection ; cast-in-situ pile ; seepage model ; injection pressure ; ratio of water of cemen ; engineering application

(上接第 94 页)

Study on the designing of the rainwater harvesting irrigation system

ZHANG Xin-yan , CAI Huan-jie , WANG Jian , CHENG Dong-ling

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

Abstract :The design of the rainwater harvesting system for irrigation has been developed. The system includes the analyzing subsystem of the sequential precipitation ,calculating subsystem of harvested rainwater amount ,optimizing subsystem of the runoff storing engineering ,optimizing model subsystem of crop irrigation system and economic model. The application of the system for field crops (wheat ,corn) in North Liquan ,Shaanxi is summarized. The results indicate the system is practical.

Key words :irrigation ; rainwater harvesting ; system designing