

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.04.033

种植结构变化下渠井结合灌区用水优化配置研究

林琳¹, 田军仓^{1,2,3}, 朱磊^{1,2,3}

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021;

2. 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021;

3. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 宁夏 银川 750021)

摘要: 本文以 Visual Modflow 软件为平台, 建立了惠农渠井结合灌区地下水模拟模型, 确定了降雨入渗补给量、不同种植结构的各种作物节水灌溉制度及灌溉入渗补给量、渠道入渗补给量、潜水蒸发量和地下水开采量, 率定和验证了水文地质参数, 模拟计算的地下水埋深与实测的地下水埋深相关系数较高, 说明渗透系数(k)、给水度(s_y)取值合理。通过惠农渠井结合灌区地下水模拟模型和线性规划模型计算分析得出最优渠井用水比为 2.1, 作物种植比例为 0.9, 灌区经济效益最大为 1 205 万元, 为灌区节水技术改造提供了理论依据。

关键词: 渠井结合灌区; Visual Modflow; 优化配置; 渠井用水比例; 线性规划

中图分类号:

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)04-0162-06

Study on Optimization Water Allocation of Canal-well Irrigation Area in the Situation of Changed Crop Plantation Layout

LIN Lin¹, TIAN Juncang^{1,2,3}, ZHU Lei^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering and Water Conservancy, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2. Ningxia Engineering Technology Research Center of Water-saving Irrigation and Water Resources Regulation,

Yinchuan, Ningxia 750021, China; 3. Engineering Research Center of Efficient Utilization of Water Resources

for Modern Agriculture in Arid Areas, Ministry of Education, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: A groundwater simulation model of Huinong canal-well combined irrigation area was established with Visual Modflow, through which the rainfall infiltration recharge, different water-saving irrigation schedules of different crop plantation layouts, the irrigation infiltration recharge, canal infiltration recharge, phreatic water evaporation as well as groundwater exploitation were determined. Meanwhile, the hydrogeological parameters were calibrated and verified. The simulation results showed that the correlation coefficient of the simulated and measured groundwater depth is high, which proved that the selected values of permeation coefficient (k) and water supply (s_y) were reasonable. According to the calculation results of the groundwater simulation model and linear programming model, the recommended optimal canal-well water ratio is 2.1, the optimal crop plantation ratio is 0.9, with a promising economic prospect of 12.05 million Yuan. This study will provide some theoretical support for the water-saving technological transformation.

Keywords: canal-well irrigation; Visual Modflow; optimization allocation; canal-well water ratio; linear programming

渠井结合灌溉不仅能合理地开发利用地下水, 防治和改良土壤盐渍化, 而且还能减少潜水无效蒸发, 提高水资源利用率, 缓解当地水资源供需矛盾。宁夏惠农灌区是一个典型的渠井结合灌区, 但由于

渠灌引水量较大, 井灌水量较小, 用水比例不合理, 使灌区地下水位上升, 引发土壤次生盐碱化。因此, 确定渠井结合灌区适宜的渠井用水比例是当前亟待解决的问题。周维博等利用多元非线性相关分析法

收稿日期: 2015-01-30

修稿日期: 2015-03-01

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目

作者简介: 林琳(1990—), 男, 黑龙江五常人, 硕士研究生, 研究方向为精准节水灌溉与信息系统新技术。E-mail: 573330656@qq.com

通信作者: 田军仓(1958—), 男, 陕西扶风人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: slxtjc@163.com

进行地下水位动态预报来分析灌区适宜的渠井用水比例^[1];代峰刚等综合应用 ArcGIS 和 PMWIN 软件模拟分析了不同灌溉情景下灌区适宜的渠井用水比例^[2];贺屹等利用地下水随机-确定动态预测模型分析确定灌区适宜的渠井用水比例^[3]。本文采用 Visual Modflow 地下水模拟模型和线性规划模型,分析确定不同种植结构下灌区最优渠井用水比例,对渠井结合灌区水资源持续利用具有重大意义。

1 研究区概况

本试验区位于宁夏惠农区李岗村,106°~107°E, N38°~40°之间,海拔 1 091.0 m,地处宁夏引黄灌区,东临黄河,西倚贺兰山,控制面积 212.4 hm²,耕地面积 143 hm²,属于温带大陆性气候,其特点为干旱少雨、多风,地表蒸发强烈,地下水丰富,埋深浅(0.5 m~2 m),土壤含盐量较高,长期以来利用黄河水进行灌溉压盐。试验田为沙壤土,耕作层土壤干密度为 1.42 g/cm³,土壤全盐量为 0.48~0.93 g/kg, pH 值为 9.63~10.13。2014 年 4 月下旬—9 月下旬降雨量为 172.9 mm,日照时数 2 026 h,平均气温 20.6℃。

试验区隶属惠农渠第七管理所,采用渠水、井水结合灌溉;渠井结合灌区实行“异水同价”,机井抽水灌溉和渠道灌溉在核定的灌溉用水定额内水价均为 0.0305 元/m³,超出定额用水实行加价收费,水价为 0.0505 元/m³,鼓励农户使用地下水。试验区由过去以主要种植粮食作物为主调整为以粮食作物和经济作物为主,其种植结构发生了较大变化。灌区包含灌溉支渠(西渠)1 条、长 1 945 m,干沟(第五排水沟)1 条,长 1 345 m,支沟(蔡家沟、艾家沟)2 条,蔡家沟长 1 990 m,艾家沟 2 000 m,灌溉机井 18 眼,如图 1。

2 地下水模拟模型

2.1 水文地质概念模型

试验区东部边界为官泗渠,西、南、北分别为第五排水沟、蔡家沟、艾家沟。试验区属贺兰山前拗陷,银川内陆断陷盆地的边缘,区内含水层主要为上新统洪积物组成的单一潜水含水层,以下部的亚砂土、亚粘土、粘土作为相对隔水底板。承压水一般埋深在 70 m 以下,为远源补给,一般不作为灌溉用水水源。潜水一般存储于第四系松散沉积层中,埋藏浅,易开发,分布广,该区农业灌溉用水主要来自于潜水,因该区内地下水的开采还未深入到承压含

水层,所以本次模拟以第四系含水层为主。其补给来源主要包括大气降水的垂直入渗补给,灌溉入渗补给,沿渠岸的渠水渗入补给等;人工开采是地下水排泄的主要方式,还包括侧向径流排泄。

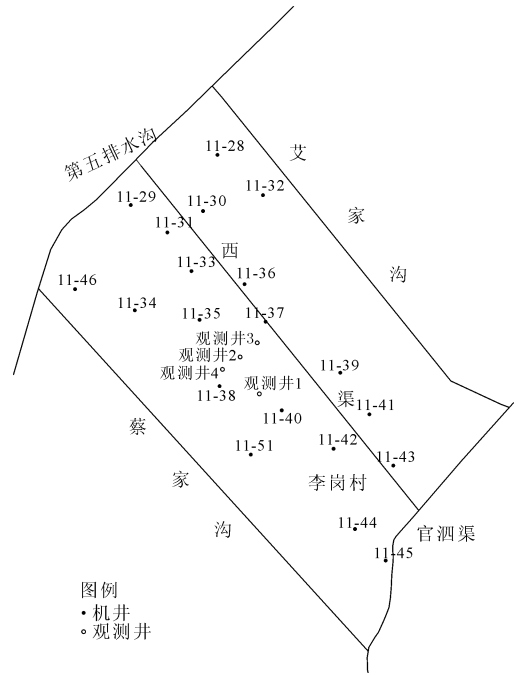


图1 试验区域及机井分布示意图

灌区东部边界接受官泗渠侧向入渗补给,概化为河流边界;西、南、北的第五排水沟、蔡家沟、艾家沟为主要的水平排泄,概化为定流量边界。

2.2 地下水模拟模型的建立

Visual Modflow 软件中水流方程及其初始条件如下:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial h}{\partial y} \right) + w = s_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (x, y) \in \Omega \quad (1)$$

$$\text{初始条件} \quad h|_{t=0} = h_0(x, y) \quad (x, y) \in \Omega \quad (2)$$

$$\text{边界条件} \quad h(x, y, t)|_{s_1} = h_1(x, y, t) \quad (x, y) \in s_1, t \geq 0 \quad (3)$$

$$k \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{s_2} = q(x, y, t) \quad (x, y) \in s_2, t \geq 0 \quad (4)$$

式中: k 为含水层渗透系数, L/T; h 为地下水位, L; w 为单位体积流量, T⁻¹, 用以代表流进汇或源的水量; S_y 为给水度, L⁻¹; \vec{n} 为边界的外法线方向; q 为渗流区第二类边界上单位面积流量, L³T⁻¹; s_1 为第一类边界面; s_2 为第二类边界面; Ω 为研究区域; t 为时间, T。

模拟区域为整个试验区,将试验区离散为 $51\text{ m} \times 46\text{ m}$ 的长方形网格,共划分为 50 行、50 列,共计 2 500 个单元,见图 2。图 2 中白色为有效计算单元,黑色为无效计算单元,上边界为潜水位,下边界为不透水层。东部边界为官泗渠,设为河流边界,根据不同灌溉时段渠道不同水位情况分别对水头进行设置;西、南、北分别为第五排水沟、蔡家沟、艾家沟,设为排水边界。

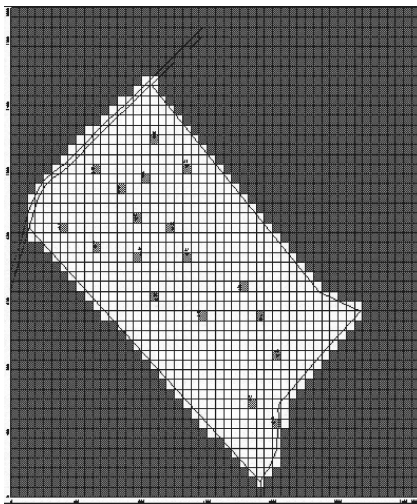


图 2 实验区模型网格剖分图

地下水模拟模型中的输入项有:降雨入渗补给,灌溉入渗补给,河流入渗补给,潜水蒸发^[4-5],地下水开采,将源汇项数据换算成强度形式,分别通过 RCH 模块, RIV 模块, EVT 模块以及 WELL 模块导入模型。

2.3 地下水模拟模型参数的率定和验证

模型的率定期设定为 2014 年 4 月 1 日至 2014 年 7 月 1 日,模型的验证期设定为 2014 年 7 月 1 日至 2014 年 10 月 1 日,以 10 d 为一个时间步长,2014 年 4 月 1 日至 2014 年 10 月 1 日灌区灌水过程线如

表 1 率定期和验证期地下水埋深计算值与观测值误差及相关系数

阶段	平均残差 δ_m/m	平均绝对残差 δ_{am}/m	标准误差估计 /m	均方根 χ_{ms}/m	标准化均方根比例 $\chi_{rms}/\%$	相关系数
率定期	-0.010	0.089	0.005	0.104	7.720	0.962
验证期	-0.031	0.116	0.016	0.150	22.667	0.900

从图 5 可见,模拟的地下水埋深与实测地下水埋深的动态变化趋势基本一致。4 月上旬,芹菜、西瓜、韭葱等经济作物灌溉第一水,灌水量较小,地下水埋深变化不大,在 2 m 左右;4 月中旬至 5 月上旬,小麦灌溉第一水及第二水,灌水量较大,引起地下水埋深减小至 1.4 m;5 月下旬,小麦灌溉第三水,

图 3,灌水量对地下水埋深的影响有延后效应。以 2014 年 4 月上旬流场作为模拟的初始水头。模型主要率定含水层的渗透系数(k)、给水度(s_y),率定期和验证期地下水埋深模拟计算值与实测值误差指标见表 1,灌区地下水流场拟合图见图 4。率定期和验证期地下水埋深计算值与实测值对比见图 5。模型率定后的渗透系数 k 为 9.5 m/d,给水度 s_y 为 0.2。

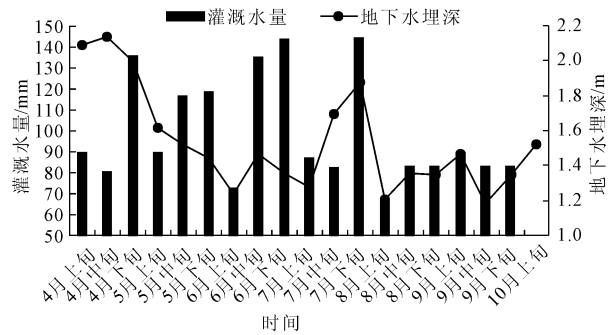


图 3 灌区各旬灌水量及地下水埋深

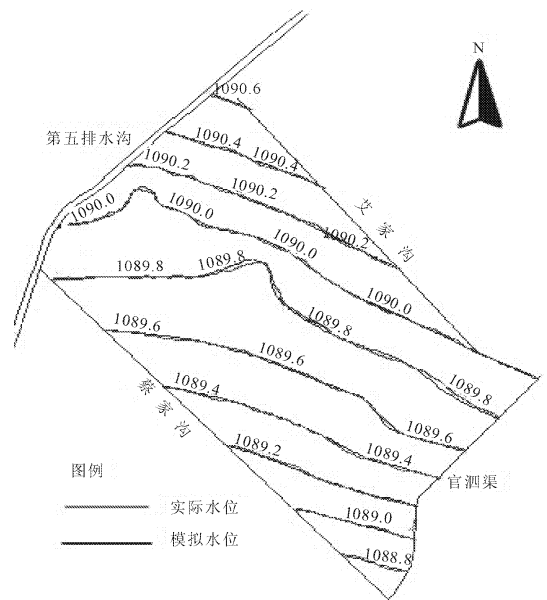
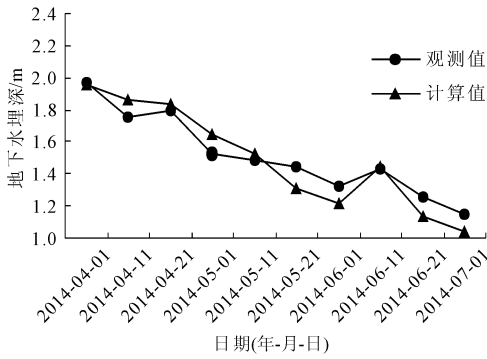


图 4 灌区地下水流场拟合图

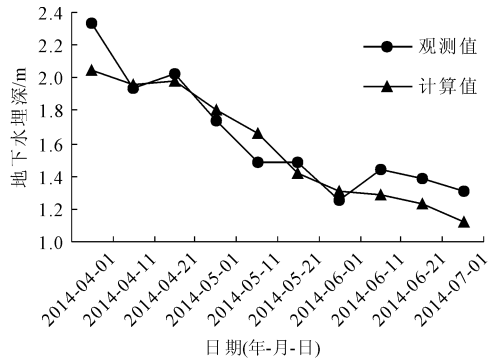
地下水埋深在 1.2 m 左右;6 月中旬,小麦灌溉第四水,玉米灌溉第一水,引起地下水埋深减小至 1 m;5 月至 6 月之间经济作物为需水旺盛期,对经济作物进行多次灌溉;7 月初至 7 月中旬,小麦收获,芹菜收获第一茬,此期间灌区停灌,地下水埋深增大至 1.8 m;7 月下旬,玉米灌溉第二水,地下水埋深减小

至 1.2 m;8月初至9月初,对经济作物进行多次灌溉;9月下旬至10月,灌区作物收获,停止灌溉,地

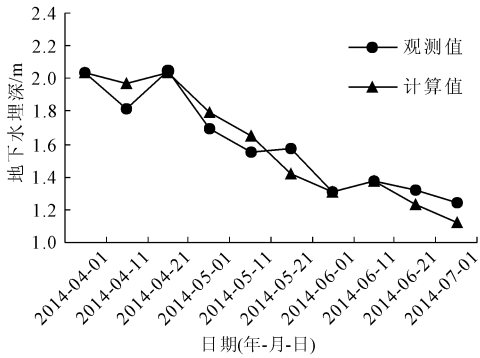
下水回落。



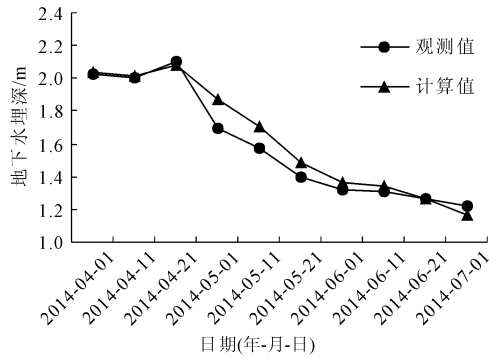
(a) 1号观测井,率定期



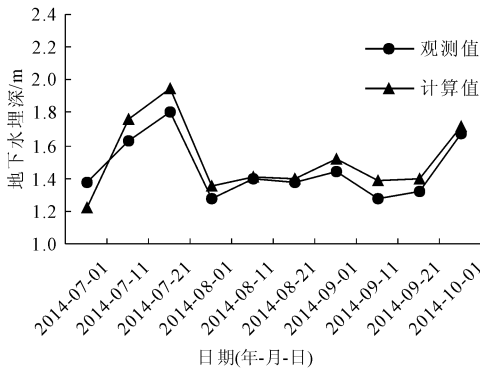
(b) 2号观测井,率定期



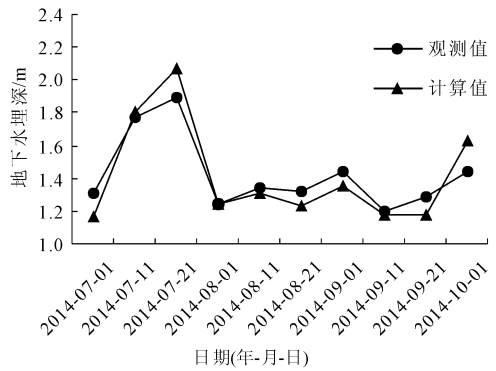
(c) 3号观测井,率定期



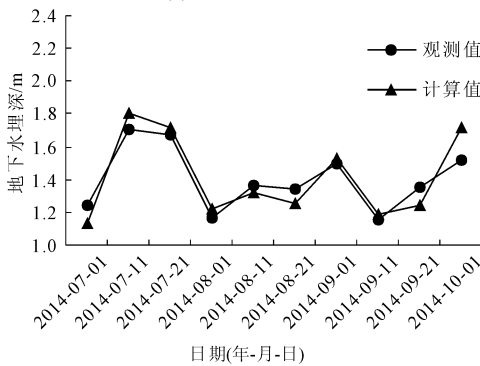
(d) 4号观测井,率定期



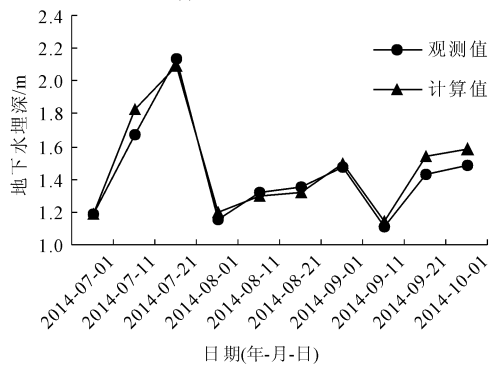
(e) 1号观测井,验证期



(f) 2号观测井,验证期



(g) 3号观测井,验证期



(h) 4号观测井,验证期

图 5 率定期和验证期地下水位埋深模拟计算值与实测值对比

从表 1 可见,率定期与验证期相关系数都在 90%以上,表明模拟计算的地下水位埋深与实测的地

下水埋深相关程度较高,对试验区的水文地质条件概化比较合理,边界条件确定比较准确,模型水文地

质参数——渗透系数 k 、给水度 s_y 取值合理,运行稳定,能够较好的反映试验区的实际情况,可以用来对灌区的地下水埋深进行预测。

3 基于地下水模拟模型的最优渠井用水比例计算分析

地下水与地表水存在着紧密的联系,地下水的主要补给来源为渠道的灌溉入渗补给。在井渠结合灌区内渠灌用水量和井灌用水量及渠井用水比例大小对灌区地下水动态的变化影响较大。

该灌区种植结构已由单一粮食作物调整为以粮食和经济作物为主的模式。根据实测的不同作物节水灌溉制度(见表 2),采用定额法对不同种植结构比例下的灌溉用水量进行计算,试验区不同作物种植结构下不同时段灌溉用水量见表 3。

表 2 生育期作物灌溉制度

作物名称	灌水次数	灌溉定额 /($m^3 \cdot hm^{-2}$)	灌溉定额 /($m^3 \cdot hm^{-2}$)
玉米	3	1110 ~ 1485	3330 ~ 4455
小麦	4	990 ~ 1245	3960 ~ 4980
芹菜	7~9	615	4305 ~ 5535
油菜	1~2	615	615 ~ 1230
韭葱	6~7	615	3690 ~ 4305
番茄	2	615 ~ 990	1230 ~ 1980
西瓜	2	750 ~ 990	1500 ~ 1980

表 3 不同作物种植结构不同时段灌溉需水量 单位:万 m^3

月份	不同种植结构(经济作物:大田作物)需水量				
	1:9	1:2	1:1	2:1	9:1
4月	4.6	5.7	6.3	6.8	8.0
5月	8.3	11.1	12.6	14.0	16.9
6月	23.6	18.4	15.8	13.2	8.0
7月	5.5	5.7	5.8	5.9	6.1
8月	15.3	11.7	10.0	8.2	4.6
9月	1.8	4.3	5.5	6.7	9.2

在不超过渠道引水量和地下水允许开采量的前提下,渠井用水比例不宜过大,过大会引起地下水位上升,潜水无效蒸发增加,水资源重复利用率低,造成土壤次生盐碱化;渠井用水比例也不宜过小,过小会引起地下水超采,造成地下水漏斗。根据试验区潜水蒸发资料以及其它地区试验研究成果^[6-7],地下水埋深在 1.8 m ~ 3 m 时,潜水无效蒸发最小,且对土壤水有补给,维持了作物的生态需水,将 1.8 m ~ 3 m 之间的地下水埋深在作为地下水生态安全埋深。

灌区经济效益按下式计算:

$$Z = k_1 W_{渠} + k_2 W_{井} \quad (5)$$

式中: Z 为灌区总经济效益,万元; k_1 为渠水灌溉效益,元/ m^3 ,取 16.6 元/ m^3 ; k_2 为井水灌溉效益^[8-10],元/ m^3 ,取 15.3 元/ m^3 ; $W_{渠}$ 为渠道引水量, m^3 ; $W_{井}$ 为机井抽水量, m^3 。

针对灌区种植结构每年变化的情况,提出 5 种主要经济作物与大田作物的种植比例,结合地下水模拟模型,寻求不同种植结构基于生态安全地下水埋深和灌区最大经济效益的适宜渠井用水比例。地下水模型与渠井用水比计算流程见图 6,所模拟计算的渠井用水比例和经济效益结果见表 4,典型观测井地下水位埋深见图 7。

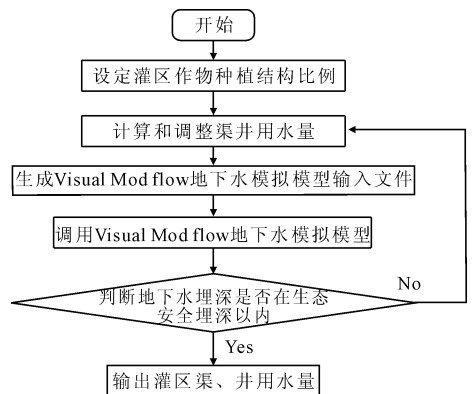


图 6 地下水模型与渠井用水比计算流程

表 4 灌区不同作物种植结构的渠井用水比例及经济效益

作物种植比例 (经济作物:大田作物)	渠用水量 / m^3	井用水量 / m^3	渠井用水比例	地下水埋深 /m	经济效益 /万元
1:9	424145	167400	2.5	2.08 ~ 2.41	961
1:2	416854	189000	2.2	1.99 ~ 2.32	982
1:1	375401	237600	1.6	1.98 ~ 2.35	987
2:1	360958	259200	1.4	1.95 ~ 2.32	996
9:1	321255	313200	1.0	1.96 ~ 2.3	1013

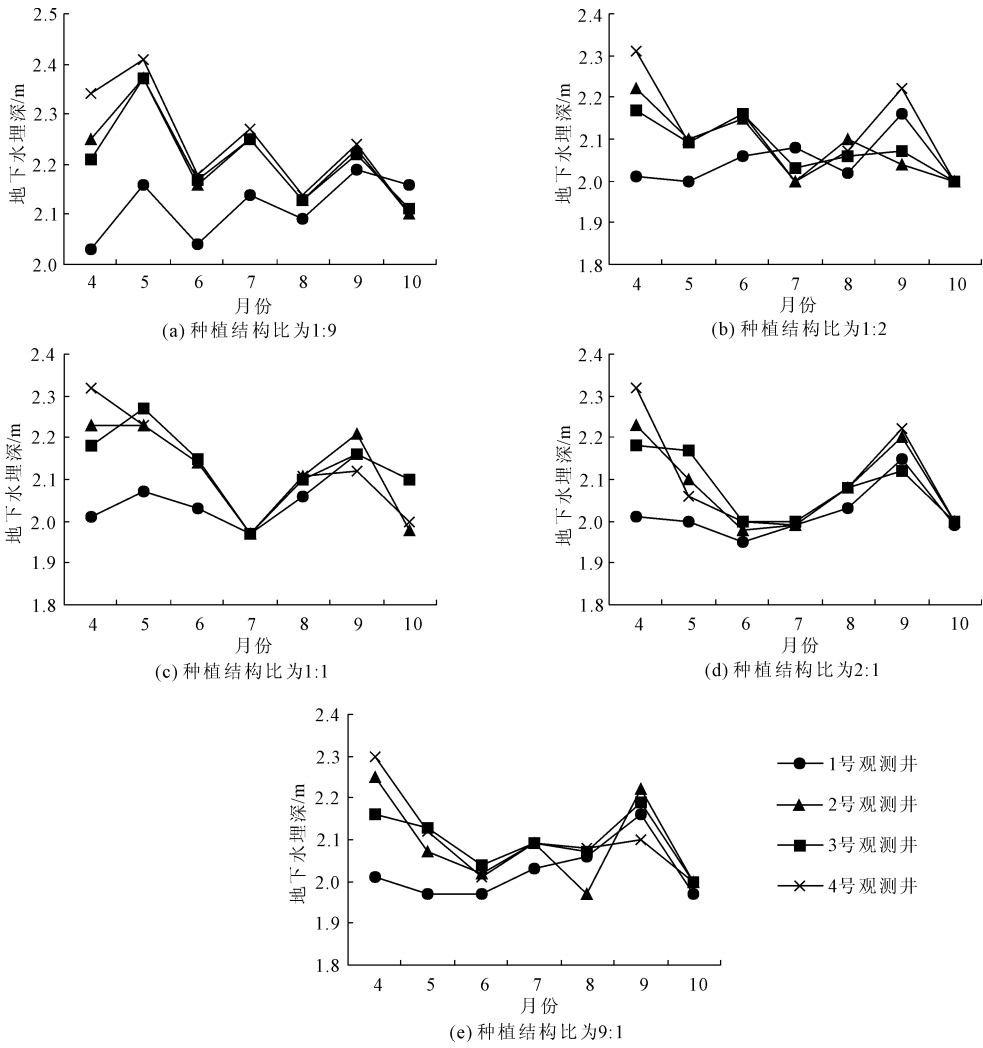


图 7 不同种植结构典型观测井地下水埋深

从表 4 看出,随着经济作物与大田作物面积比增大,渠井用水比例不断减小,但地下水水位仍在生态安全水位之内。种植经济作物,井灌有灵活的特点,井灌不受黄河季节来水的限制,可以保证作物适时灌溉,适合经济作物的灌水要求。考虑到黄河引水的季节性因素以及经济作物灌水次数多等因素,建议黄河来水期适当增大渠井用水比例,以渠养井,黄河枯水期减小渠井用水比例,以井补渠,渠井结合。

根据表 4 的渠井用水比例及经济效益,建立试验区渠井用水优化配置线性规划模型:

目标函数为:

$$\max Z = k_1 W_{渠} + k_2 W_{井} \quad (6)$$

约束条件为:

$$W_{渠} + W_{井} < W_{\max总} \quad (7)$$

$$W_{渠} + W_{井} > W_{\min总} \quad (8)$$

$$W_{渠} < W_{\max渠} \quad (9)$$

$$W_{渠} > W_{\min渠} \quad (10)$$

$$W_{井} < W_{\max井} \quad (11)$$

$$W_{井} > W_{\min井} \quad (12)$$

$$W_{渠} > 0 \quad (13)$$

$$W_{井} > 0 \quad (14)$$

式中: $W_{\max总}$ 为灌区最大灌溉总用水量, m^3 ; $W_{\min总}$ 为灌区最小灌溉总用水量, m^3 ; $W_{\max渠}$ 为渠道最大引水量, m^3 ; $W_{\min渠}$ 为渠道最小引水量, m^3 ; $W_{\max井}$ 为机井最大抽水量, m^3 ; $W_{\min井}$ 为机井最小抽水量, m^3 。

Z 、 k_1 、 k_2 、 $W_{渠}$ 、 $W_{井}$ 符号意义同上。

利用单纯形法求解上述线性规划模型,结果为:渠道灌溉引水量为 $424\ 145\ m^3$,井抽水量为 $210\ 310\ m^3$,渠井用水比例为 2.1,灌区经济效益最大为 1 025 万元,地下水埋深在 2.24 m ~ 2.45 m 之间,在地下水生态安全埋深以内,求得经济作物种植面积与大田作物种植面积为 0.9。

(下转第 194 页)