

井渠结合灌区水资源高效利用调控模式

齐学斌, 樊向阳, 王景雷, 高胜国

(水利部农田灌溉研究所, 河南 新乡 453003)

摘要: 根据水资源平衡的原理, 对井渠结合灌区的地表水和地下水进行联合优化调度, 并采取地膜覆盖集雨种植节水技术和引洪补源技术, 实现灌区水资源的高效可持续利用。实践表明: 采取沟渠蓄水和定额灌溉的补源方式, 效果明显; 采取地膜覆盖集雨种植节水技术, 增产幅度达17.4%; 采取水资源优化调度技术, 平均净增效益3000元/hm²左右, 并可实现水资源采补平衡。

关键词: 井渠结合灌区; 水资源; 高效利用; 调控技术

中图分类号: S273 **文献标识码:** A

针对目前我国井渠结合灌溉类型区存在的主要问题, 在山西省选择有代表性的井渠结合灌溉类型区, 从资源有效利用与合理配置的角度出发, 通过对地表水与地下水资源联合调度与优化配置模型、农田水分高效利用措施及引洪补源, 在充分利用降雨和洪水资源的基础上, 通过输配水工程与节水工程、优化调度模型、农田水分高效利用综合措施及管理等手段, 实现地表水、地下水资源的联合调度与优化配置, 达到节水高效和改善地下水环境的目的。并通过已有技术的技术集成、组装配套与创新, 为我国同类型区提供较为成熟的农业高效用水模式。

1 试验区概况

试验区位于山西省晋中市榆次区, 总土地面积7700hm², 耕地面积3973.4hm², 人口3.8万人。种植作物: 冬小麦、玉米、高粱、蔬菜、林果及豆类作物, 其中冬小麦、春玉米种植面积较大, 作物以两年三熟居多。试验区多年平均年降水量447mm, 多年平均蒸发量2068.5mm, 由于冬春缺雪雨, 加之蒸发量大, 春旱十分严重。农业用水以开采地下水为主, 洪水灌溉为辅, 潇河为主要的引洪渠道, 由于不能对潇河实施有效调节, 潇河来水与作物需水不同步, 农业用水十分紧缺。试验区地下水年超采169万m³, 导致地下水位持续下降, 严重地破坏了地下水环境, 制约着该区工农业的发展。

2 引洪水和地下水优化调度技术

2.1 地表水和地下水联合调度模型 地表水、地下水联合调度大系统由水资源系统和用水系统二部分组成。水资源系统根据水文地质及行政区划等因素划分为3个计算分区, 每个分区又有地表水(潇河水)和地下水两种水源; 用水系统则在划分3个分区的基础上, 根据试验区作物组成情况分为冬小麦、玉米、高粱、蔬菜、其它作物, 这样就将试验区地表水、地下水联合调度系统分解成3个层次、3个子系统的多层递阶结构, 见图1。

收稿日期: 2003-05-19

基金项目: 国家重大科技产业化工程项目(99-021-01-08)

作者简介: 齐学斌(1963-), 男, 陕西西安人, 副研究员, 硕士, 主要从事地表水、地下水转化机理与农业节水等方面的研究。

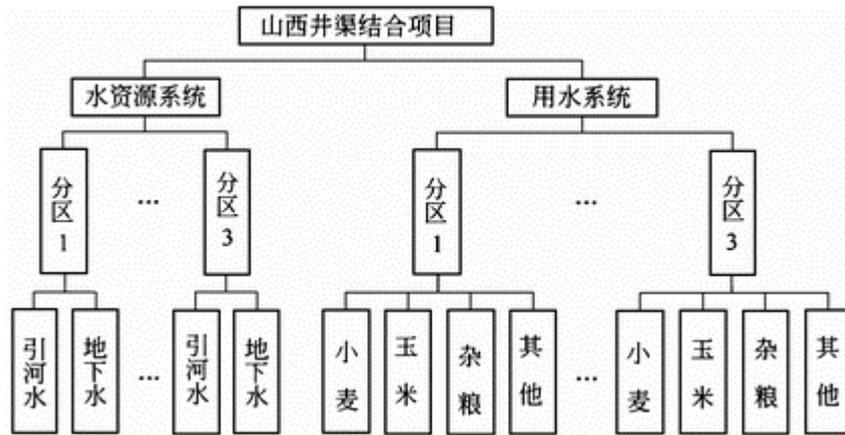


图1 地表水和地下水联合调度递阶结构

2.1.1 决策变量 各种作物的种植面积为 $x_1, x_2, \dots, x_5(\text{hm}^2)$ ；各种作物的产量为 $x_6, x_7, \dots, x_9(\text{kg}/\text{hm}^2)$ ；由于缺乏试验区各月的引洪资料，暂按春、夏、秋冬3个大的时段设置决策变量，各种水源各时段的引、开采水量为 $x_{10}, x_{11}, \dots, x_{18}(\times 10^4\text{m}^3)$ 。

2.1.2 目标函数 将整个系统所获得的净增效益最大作为目标函数，虽然潇河无调节措施，但地下水含水层可作为地下水库考虑，模型目标函数可表达为

$$\max f(x) = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \varepsilon \gamma_i (y_i - y_{i0}) \times A_i V_i - \sum_{k=1}^m (C_{gm} + C_{wm} + C_{tm} + C_{sm} + C_{qwm} + C_{qtm} + C_{rm}) \quad (1)$$

式中： $f(x)$ 为灌溉工程的年净增效益； k 为试验区分区号； m 为分区数； ε 为灌溉工程的效益分摊系数； γ_i 为考虑副产品收入后的折算系数； y_i 为第 i 种作物灌溉后的单位面积产量(kg/hm^2)； y_{i0} 为第 i 种作物不灌溉时的单位面积产量(kg/hm^2)； V_i 为第 i 中作物的价格(元/kg)； i 为灌区作物种类的序号； n 为灌区作物的总数目； C_{gm} 为各分区抽取地下水的动力费用； C_{wm} 为各分区抽取地下水的维修费用(万元/年)； C_{tm} 为各分区井灌工程的投资折算费用(万元/年)； C_{qsm} 为引用潇河水(包括处理过的污水)的动力和管理费用； C_{qwm} 为引用潇河水(包括处理过的污水)灌溉的维修费用(万元/年)； C_{qtm} 为各分区引用潇河水(包括处理过的污水)灌溉的投资(万元/年)； C_{rm} 为各分区人工回灌地下水含水层的费用。

2.1.3 约束条件

(1)各时段引用潇河水(包括处理过的污水)的水量不应超过该时段潇河水(包括处理过的污水)对试验区的最大可能供水量

$$\sum_{k=1}^m W_{stk} + \sum_{k=1}^m W_{htk} \leq W_{st}^* \quad \forall t \quad (2)$$

式中： W_{stk} 为各分区 t 时段引用的灌溉水量； W_{htk} 为各分区 t 时段需要回灌的水量； W_{st}^* 为 t 时段潇河(包括处理过的污水)的最大可能供水量，按多年平均考虑。

(2)地下水的年开采量不能超过可开采量

$$\sum_{t=1}^3 \sum_{k=1}^m W_{dtk} \leq 2W_{dkk}^* \quad (3)$$

式中： W_{dtk} 为各分区各时段抽取的地下水量； W_{dkk}^* 为维持地下水平衡时的地下水可开采量。

(3)各种作物种植面积约束。各种作物的种植面积不能大于该作物的最大种植面积，即

$$A_i \leq A_i^* \quad (4)$$

式中： A_i 为作物种植面积； A_i^* 为第*i*种作物的最大种植百分比； A 为试验区总的耕地面积。

(4)作物灌水量约束。作物各时段的灌水量及有效降雨量之和应满足项目区内作物的需水要求

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n A_{ki} K_{kit} E_{ik}(y_{ik}) - \eta_1 W_{qtk} - \eta_2 W_{tk} - \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \sigma_{ik} A_{ik} P_{tk} \leq 0 \quad \forall t \quad (5)$$

式中： K_{kit} 为各分区第*i*种作物在*t*时段的需水量模比系数； $E_{ik}(y_{ik})$ 为各分区第*i*种作物全生育期的田间需水量，为作物产量的函数； η_1 、 η_2 分别为渠灌、井灌时的田间水利用系数； σ_{ik} 为各分区第*i*种作物的降雨有效利用系数； P_{tk} 为各分区*t*时段的降雨量； W_{itk} 为各分区*t*时段第*i*种作物由于根系活动加深而增加的水量与可利用的地下水补给量之和。

(5)提水设备的抽水能力约束。各时段地下水的开采量不得超过机井的抽水能力，即

$$W_{dtk} \leq W_{ctk} \quad (6)$$

式中： W_{ctk} 为各分区*t*时段机井的抽水能力。

(6)回灌水量约束。年内各时段允许的回灌水量不能超过地下含水层允许的回灌水量

$$\sum_{t=1}^T W_{rtk} \leq W_r^* \quad (7)$$

式中： W_r^* 为年内各时段允许的回灌水量之和； W_{rtk} 为各分区各时段地下水的回灌量。

(7)开采量约束。开采量约束在水源约束已考虑。

(8)总产量约束。各种作物的总产量必须满足当地需求

$$\sum_{k=1}^m A_{ik} y_{ik} \geq y_i^* \quad (8)$$

式中： y_i^* 为第*i*种作物总需求量。

(9)非负约束。所有决策变量都应非负。

2.2 计算结果 根据上述概化模型和数学模型，试验区地表水(潇河水)、地下水联合优化调度年内分配值计算结果见表1。作物种植面积及产量，计算结果见表2。

表1 各时段不同水源最优分配量
(单位: 万m³)

时段	春灌	夏灌	秋冬灌
地下水	835	198	173
潇河(包括污水)	灌溉水	347	466
	补源水	0	96

表2 各种作物最优种植面积及净增效益

作物	冬小麦	玉米	高粱	蔬菜	其它
面积/hm ²	800	867	133	1600	800
产量/(kg/hm ²)	7500	8355	7950	18000	
净效益/万元	1256				

由表1、表2知,在多年平均降雨及种植条件下,试验区水资源基本能满足作物用水需求,但必须采取各种方式节流、开源。在多年平均降雨情况下,如果调整农业种植结构,压缩高耗水作物的种植比例,如小麦压缩到25%左右,增加蔬菜等经济作物种植面积,试验区净增效益将达到1256万元,平均净增效益为3000元/hm²左右,并可实现水资源的采补平衡。

3 春玉米地膜覆盖集雨种植节水技术

3.1 春玉米生育期降雨特点 试验区春玉米全生育期降雨量170~570mm,多年平均354mm,总降雨量基本能满足玉米生长发育的要求,但在玉米播种、苗期、穗期3个阶段降雨量偏少,尤其春季雨少风多,土壤严重失墒干旱,影响播种和幼苗的生长。春玉米生长期降雨量的分布是:在玉米播种至6月中下旬的苗期以日降雨量小于10mm的小雨为主,占同期降雨量的75.6%,全生育期日降雨量小于10mm的小雨占总降雨量的47%。特别是对于一次降水过程降水量 2.5mm的无效降水,由于其强度小,降水往往未及渗入土壤之前就已蒸发散失,使得宝贵的降水资源不能充分利用。如何充分有效地储蓄这部分自然降水,提高降水利用率,对于确保玉米增产丰收有重要意义。

3.2 试验设计 试验设平地起垄,垄、沟相间,垄宽30cm,沟宽20cm,垄高15~20cm,沟深约5~6cm,如图2所示。起垄后在垄上覆膜,靠地膜的聚水作用,使少量的降雨也可顺膜集流于垄沟内,入渗到土壤深层,改善春玉米根部土壤水分状况,同时垄上覆膜可减少蒸发面65%,可将有限的降雨最大限度地贮蓄在土壤

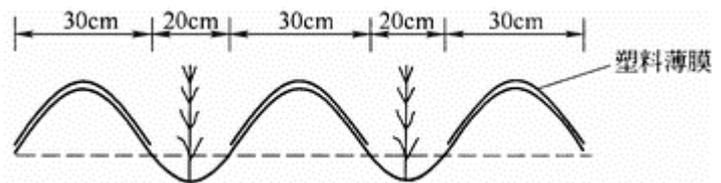


图2 春玉米田集雨覆膜种植示意

中,达到高效利用降雨的目的。在沟内种植玉米,株距32~34cm,种植密度60000株/hm²左右。播前结合整地,按农家肥60m³/hm²,多元素、高效玉米专用肥1300kg/hm²,作底肥一次施入。试验以小畦平播为对照,采取随机区组设计,重复3次,小区面积40m²。供试品种为强盛8号。覆盖地膜厚度为0.006mm,宽度400mm。

春玉米播种日期为4月中旬,播量为49.5kg/hm²;自播种之日起,采用土钻法分层测定集雨覆盖垄背及垄沟0~100cm土层土壤含水量,20cm为一层,每10d观测一次,重复3次,降雨或灌溉前后各加测一次;定期观测集雨覆盖处理垄背、垄沟及对照5cm,10cm,15cm,20cm深处地温;降雨量观测;有关生理指标调查;9月中旬成熟后取样测产并进行考种,调查穗粒数、千粒重等。

3.3 作物耗水量和耗水强度的确定 作物耗水量由农田水分平衡法计算,即:

$$ET_{1-2} = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i (W_{i1} - W_{i2}) + M + P + K - C \quad (9)$$

式中:ET₁₋₂为阶段耗水量(mm);i为土壤层次号数;n为土壤层次总数目;γ_i为第i层土壤干容重(g/cm³);

H_i 为第*i*层土壤厚度(cm); W_{i1} 、 W_{i2} 分别为第*i*层土壤在计算时段始、末的含水率(干土重的百分率); M 、 P 、 K 、 C 分别为时段内的灌水量、有效降雨量、地下水补给量和排水量(地表排水与下层排水之和)(mm), 由于在春玉米生育期内, 地下水埋深始终在5m以下, 因此, 取 $K=0$ 。由于采取了节水灌溉制度, 灌溉弃水量可忽略不计。

根据春玉米各生育期内的灌溉定额及降水量、0~100cm土层平均贮水量的观测值, 由式(9)计算得各生育期的作物耗水量, 见表3。

表3 春玉米地膜覆盖处理农田耗水量及耗水特征

处理	播种~拔节		拔节~抽雄		抽雄~灌浆		灌浆~成熟		全生育期
	耗水量 /mm	耗水强度 /(mm/d)	耗水量 /mm	耗水强度 /(mm/d)	耗水量 /mm	耗水强度 /(mm/d)	耗水量 /mm	耗水强度 /(mm/d)	
垄膜沟种	56.47	1.34	130.07	3.81	75.12	3.76	145.87	2.75	407.53
对照	63.16	1.49	161.86	4.90	66.36	3.16	147.36	3.07	438.74

从表3可以看出, 塑膜覆盖后, 春玉米的耗水规律与不覆盖处理没有大的差异。经方差分析, 地膜覆盖处理农田耗水量较对照达到了显著水平(*t*检验)。从阶段分布来看, 塑膜覆盖处理苗期、拔节期保墒效果较好, 有地膜覆盖的情况较不覆盖的情况耗水量减少较多, 这主要是因为作物较小, 田间耗水以棵间土壤蒸发为主, 而地膜覆盖后, 由于地膜的阻隔, 切断了土壤水分与大气的直接交换, 使水分无法散失到大气中, 农田的土壤蒸发受到抑制, 从而降低了耗水强度。

3.4 集雨覆盖处理的产量及水分利用率 仅仅只从耗水量的变化情况看, 地膜覆盖种植比不覆盖农田减少5%~10%。这里再从覆盖处理的增产效果和水分生产效率方面进行分析。地膜覆盖处理对春玉米产量构成因素、耗水系数及水分利用效率的影响见表4。

表4 地膜覆盖对春玉米产量构成因素及水分利用效率的影响

项目	成穗数 /(穗/hm ²)	穗粒数/ 粒	百粒重 100/g	籽粒产量		耗水量 /mm	耗水系数 /(m ³ /kg)	水分利用效率 /(kg/hm ² ·mm)
				/(kg/hm ²)	(%)			
垄膜沟种	49000	556	39.8	10707	117.4	407.53	0.380	26.3
对照	45736	509	39.3	9118	100.0	438.74	0.467	20.8

由表4可以看出, 地膜覆盖垄沟种植处理成穗率明显提高, 春玉米穗粒数增加47粒, 百粒重增加0.5g, 单产增产幅度达17.4%, 耗水系数减少18.6%, 水分生产率提高26.4%。因此, 地膜覆盖节水的意义更重要的在于将棵间土壤无效蒸发转换为作物的有效蒸腾和水分生产效率的提高上。

4 引洪补源技术

由于近几年持续干旱, 潇河来水量偏少且大都集中在汛期, 导致大量开采地下水, 地下水位持续下降, 水环境恶化。引用汛期洪水补源, 将洪水蓄存于土壤与含水层中是缓解来水矛盾, 遏制地下水位持续下降的有效措施之一。土壤水平衡概化示意如图3所示。由此可得土壤水平衡方程:

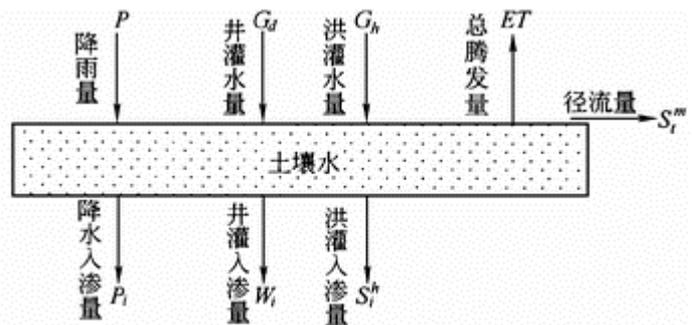


图3 试验区土壤水平衡概化

$$P + G_d + G_h - S_i^h - P_i - W_i - ET - S_i^m = \Delta S_w \quad (10)$$

在现状种植结构、灌溉和引洪条件下，为保持作物的稳产高产，必须保持年度内土壤水的平衡，即 $S_w=0$ 。又根据作物水分生产函数关系，在作物种植结构及产量水平不变的情况下作物的腾发量变化不大，这里采用统一数值。将不同水平年各参数值代入上式，可求出不同水平年的井灌水量 G_d ，即井灌开采量 W ，再加上工业及人畜生活用地下水开采量 G_w ，即可求出地下水开采量，见表5。

表5 不同频率保持土壤水平衡的地下水开采量 (单位：万 m^3)

频率	降雨量P	洪、污灌水量 G_{hw}	径流量 S_i^m	降雨入渗量 P_i	洪、污灌入渗量 S_i^{hw}	开采地下水入渗量 W_i	腾发量 ET	井灌水量 G_d	地下水开采量 G_d+W
多年平均	3109	1033	256	314	307	132	4101	947	1124
25%	3839	721	384	499	217	106	4101	726	903
50%	3003	1203	226	300	356	124	4101	881	1058
75%	2734	724	186	202	218	187	4101	1415	1593
95%	1756	431	110	130	133	325	4101	2592	2769

根据表5中求得的地下水开采量和试验区地下水平衡方程，可求出不同频率在当前引洪能力下的地下水蓄变量，见表6。

表6 不同频率当前引洪能力下地下水蓄变量计算 (单位：万 m^3)

频率	降雨入渗量 P_i	洪污灌入渗量 S_i^{hw}	地下水侧向流入量 G_i	开采地下水入渗量 W_i	地下水开采量 $W+G_w$	地下水侧向流出量 G_{it}	潜水蒸发量 E	地下水蓄变量 h
多年平均	314	307	417.7	132	1124	141.8	0	-96
25%	499	217	417.7	106	903	141.8	0	194
50%	300	356	417.7	124	1058	141.8	0	-2
75%	202	218	417.7	187	1593	141.8	0	-710
95%	130	133	417.7	325	2769	141.8	0	-1905

从表6可看出，试验区除了丰水年地下水蓄变量为正，其它水平年地下水均呈下降趋势，因此，必须加大丰水年和汛期的引洪量，扼制地下水位持续下降的状况。

表7 试验区不同水平年引洪量计算 (单位：万 m^3)

频率	多年平均	25%	50%	75%	95%
潇河来水量	12324	16077	12082	4557	2119
试验区现状引洪量	693	381	863	384	91
引洪量地下水蓄变量	96	-194	2	710	1905
试验区占灌区引洪(%)	15.24	15.24	15.24	15.24	15.24
灌区引洪量	5175	1224	5672	7178	13100
灌区引水占潇河来水(%)	42	8	47	158	618

为使地下水位维持平衡，不使水环境持续恶化，引洪量至少应等于地下水的蓄变量，加上当前引洪量，不同水平年的引水量见表7。

从表7可看出,多年平均条件下,灌区引洪量达到潇河来水量的42%即可维持地水平衡,但在中等干旱和干旱年型下,即使把潇河径流完全利用,也不能维持地下水的平衡,相反在丰水年,灌区引洪达到潇河来水量的8%便可保持地下水位不下降,因此,只有在丰水年加大引洪量,才能做到以丰补歉,从而使试验区地下水环境在正常年份维持平衡。为了解决汛期洪水历时短、让汛期洪水尽可能地回灌地下水,根据试验区的实际情况,作者选择了沟渠蓄水和定额灌溉的补源方式。

5 结束语

井渠结合、地表水地下水联合利用是我国北方灌区的发展方向,本文针对山西晋中井渠结合灌区的水资源特点,特别是灌区为无坝引水,汛期雨水得不到有效利用等特点,在进行水资源平衡分析基础上,提出了引洪补源方案,并采取引洪系统改造与引洪补源技术,收到了较好的效果。针对试验区春季雨少风多,春玉米播种至6月中下旬的苗期以日降雨量小于10mm的小雨为主,降水资源不能充分利用等特点,采取地膜覆盖集雨种植节水技术,较对照春玉米籽粒产量增加1589kg/hm²,增产幅度达17.4%。通过采取水资源优化技术,在实现水资源采补平衡条件下,平均每公顷净增效益3000元左右,取得了较好的经济、社会及环境效益。

由于井渠结合灌溉类型区问题的复杂性,加之研究时间等方面的限制,还有一些问题,如节水灌溉工程标准的制定、地表水与地下水统一调控水价的制定等,有待于今后进一步开展此方面的研究。

参考文献:

- [1] 雷志栋,杨诗秀,谢传森.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [2] Bwire S,Ojiambo,Robert J.Ground Water/Surface Water Interactions in Lake Naivasha, Kenya, Using ¹⁸D, and ³H/³He Age-Dating[J]. Ground Water, 2001, 39(4): 526-533.
- [3] 齐学斌,等.农业节水与地下水开发利用[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [4] 王改兰,黄学芳,郭堃梅,等.玉米田间微集水种植的水温效应及其对植株生长发育的影响[J].农业工程学报,2000,16(增刊):61-64.

Optimal allocation of water resources in well-canal combined irrigated area for high efficient utilization of water

QI Xue-bin, FAN Xiang-yang, WANG Jing-lei, GAO Sheng-guo
(Farmland Irrigation Research Institute, Xinxiang 453003, China)

Abstract: According to the principle of water resources balance, the model for describing coordinative optimal allocation of surface water and groundwater in well-canal combined irrigated area is proposed. Besides, the technique of rainwater collecting and mulching as well as the technique of groundwater replenishment by flood are used to realize the sustainable development of water resources. The experimental result indicates that the effect of adopting this integrated technique is remarkable. The yield of corn increases by 17.4% and the benefit increases 3000 Yuan/hm², at the same time, the balance between water consumption and replenishment is realized.

Key words: allocation of water resources; well-canal combined irrigated area; surface water; groundwater;

balance of water consumption and replenishment