

引水减少对河套永联试验区田间水均衡影响分析

江 燕¹, 王修贵², 刘昌明¹, 武夏宁³

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;
3. 中国水电建设集团国际工程有限公司, 北京 100044)

摘要: 以河套灌区永联试验区的六队六八斗渠控制区域为研究区域, 采用荷兰 Wageningen 农业大学开发的 SWAP (Soil Water Atmosphere Plant) 模型, 模拟分析了引水减少条件下的田间水均衡要素变化规律。结果显示蒸散发量占总耗水量的比例在 90% 以上, 验证了河套灌区的耗水类型是以垂向的蒸散发为主。随着引水量减少, 模拟的相对产量也显著降低。可见, 当灌区年平均引水量从 52 亿 m³ 减少到 40 亿 m³ 时, 现有种植结构下的作物产量将会受影响。因此, 引水减少后的种植结构和灌溉制度需适度调整。

关 键 词: SWAP 模型; 引水减少; 水均衡

中图分类号: TV213.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2009)03-0356-05

由于黄河水资源日趋紧缺, 沿黄地区的生产、生活受其制约也日渐加剧, 合理高效利用黄河水资源迫在眉睫。农业是河套灌区的用水大户, 根据国家和内蒙古自治区的引黄分水方案, 河套灌区每年允许引黄水量 40 亿 m³, 但目前每年超计划引水约 12 亿 m³。为有效控制农业用水, 需分析引水灌溉减少对灌区水均衡要素的潜在影响。SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) 模型在模拟田间水均衡要素方面有过一些研究^[1~4]。本文利用 SWAP 模型模拟河套灌区永联试验区引水减少条件下田间水分运动, 分析引水减少条件下田间水均衡要素变化规律, 为河套灌区落实引水方案提供科学参考。

1 试验区概况

永联试验区位于河套灌区义长灌域内。试验区南北狭长约 12 km, 东西长不足 3 km。地势自南向北逐渐降低, 全区地面平均坡度约 3/10000。试验区的四周边界均为排水沟, 区域南边的排水沟外侧有皂火干渠经过。试验区内, 由人民支渠单独从皂火干渠取水, 由南向北为各斗渠输水灌溉。试验区涵盖了灌区不同类型土地 (如耕地、荒地、海子、村庄、道路、灌排渠系等), 总面积约 28.8 km², 其中人民渠控制的灌溉面积约 13.5 km², 耕地约占总面积的 47%, 基本反映了河套灌区的土地利用特点, 具有一定代表性。

2 研究方法

2.1 试验观测

试验开展时间为两年 (2004 - 2005 年), 主要工作包括降雨和灌溉等来水量观测、土壤含水量和地下水位等土壤水分状态观测、排水沟部分断面的水位观测, 当地气象站常规观测, 以及土地利用调查和作物种植结构统计等。考虑土壤根系吸水大部分在地表层 1 m 内, 故试验区的根系层取为 1 m。降雨量采用常规雨量筒观测。

收稿日期: 2008-06-29

基金项目: 国家高新技术研究发展计划 (863) 资助项目 (2006AA100207); 国家自然科学基金资助项目 (50239090; 50809004)

作者简介: 江 燕 (1979 -), 女, 湖北咸宁人, 博士后, 主要从事流域水循环模拟方面的研究。E-mail: lirenjy@sohu.com

灌溉量采用测流法量测渠道流量,地下水水位采用水锤法测量观测井潜水位,每6d记录一次。土壤含水率采用洛阳铲取土再进行烘干法测定。在每个监测深度取样土2份,2004年取土最大深度为1m,为进一步了解土壤含水量变化规律,2005年取土最大深度为1.4m。一般每10d取土一次,观测日遇上田间灌水则取消本次观测。对于排水沟水情观测,由于试验区边界的分干沟的排水量小且流速慢,以致沟水位很低,无法进行流量观测和排水量计算,因此只在沟中安放水尺,进行沟水位观测。

2.2 引水方案

永联试验区位于河套灌区狭长灌域内。由于试验区的灌溉水量以斗渠统计,为此,本文选取永联试验区的六队六八斗渠控制区域为研究区域。试验期为两年,其中2004年(降雨191mm)和2005年(降雨69mm)接近于当地的平水年和枯水年,将这两年近似为典型年以分析引水减少条件下田间水均衡要素的变化趋势。两典型年生育期灌溉分别设置4种方案(表1、表2):灌水时间与当年的现状相同,灌水量分别为当年的100%(即实际灌溉)、80%、60%和0%(即不灌溉)。由于灌水量为斗渠控制区域的逐日平均灌溉深度,因此部分实际灌溉量出现小于5mm的情况可能是发生局部灌溉,对于设计灌溉量小于5mm这种实际工程无法实现的情况,本文仅是用于趋势分析以做对比。

2.3 模拟模型

SWAP模型^[5]是一个模拟田间尺度土壤水、溶质、热量运移和作物产量的计算机模型,是土壤-大气-植物系统的集总式模拟。模型主要包括土壤水流运动、溶质运移、蒸散发计算、作物生长模拟等几个部分。系统上边界为有作物的土壤表面和大气,下边界可以是非饱和带底部或饱和带的顶部,也可以位于饱和带之中或者位于不透水层(弱透水层)顶板,饱和带的侧向边界为两条平行的排水沟或者已知的地下水位条件。在非饱和带,SWAP假定水流运动的主方向是垂直的,因此,采用一维水盐运移模型。当下边界位于饱和带时,由于饱和带中存在三维(或二维)的水流运动,需要进行饱和与非饱和、一维和二维(或三维)的水流耦合计算。在垂直方向上,SWAP将土层分为不同的单元,在每个单元上耦合求解水分及溶质运动方程和热量传输方程。考虑到蒸发与蒸腾具有不同的动力机制,SWAP将蒸发与蒸腾分开计算。

表1 研究区域平水年灌溉方案(2004) mm

Table 1 Scheme of irrigation for the year of normal rainfall in the studied area in 2004

日期	实际灌溉量	原灌溉量的80%	原灌溉量的60%	不灌溉
2004-05-13	11.3	9.1	6.8	0
2004-05-14	8.3	6.6	5.0	0
2004-05-15	14.9	11.9	8.9	0
2004-05-25	9.4	7.5	5.7	0
2004-05-26	7.3	5.8	4.4	0
2004-06-19	7.5	6.0	4.5	0
2004-06-20	5.7	4.5	3.4	0
2004-06-22	7.8	6.2	4.7	0
2004-06-30	2.5	2.0	1.5	0
2004-07-18	8.8	7.0	5.3	0
2004-07-19	4.3	3.5	2.6	0
2004-07-20	10.3	8.2	6.2	0
2004-07-31	13.4	10.7	8.0	0
2004-08-01	7.6	6.1	4.6	0
合计	119.1	95.1	71.6	0

表2 研究区域枯水年灌溉方案(2005) mm

Table 2 Scheme of irrigation for the year of short rainfall in the studied area in 2005

日期	实际灌溉量	原灌溉量的80%	原灌溉量的60%	不灌溉
2005-05-18	5.5	4.4	3.3	0
2005-05-27	19.0	15.2	11.4	0
2005-06-16	2.2	1.7	1.3	0
2005-06-17	6.0	4.8	3.6	0
2005-06-18	12.8	10.2	7.7	0
2005-07-04	13.4	10.7	8.0	0
2005-07-05	18.2	14.6	10.9	0
2005-09-15	8.1	6.4	4.8	0
2005-09-16	2.5	2.0	1.5	0
合计	87.5	70	52.5	0

本文以试验区的六队六八斗渠控制区域为模拟区域,该区域边界为排水沟,排水沟间距是1000m,深度是1.5m。通过SWAP模型模拟排水工程措施对田间水均衡要素的影响。模拟时间为2004年的5月1日~9月30日。模拟区域种植作物为向日葵。SWAP模型上边界包括降雨量、蒸散发量和灌溉量。降雨量和灌溉量由观测可确定,蒸散发量由模型计算,其中模型计算潜在逐日蒸散发量所需数据采用气象站的逐日气象资料。下边界采用的土壤剖面底部通量为0,为此在SWAP中需

输入各层土壤类型以确定相应的土壤参数，同时要求底部为隔水层。根据土壤特性调查，将土壤剖面粗略划分3层，由于SWAP的表层土壤对水分非常敏感，变化波动很大，故第1层取地表5 cm，第2层为耕作活动层取5~70 cm，第3层为稳定土层，通过地质资料发现地表32 m处有不透土层，故范围取为70~3 200 cm，土壤水力参数参考相关成果确定^[6]。下边界的水平排水量采用Hooghoudt和Ernst的排水公式计算^[7]。

表3 研究区域2004年土壤含水率模拟值与实测值的均方差

Table 3 RMSE between simulation and observation of soil water content in the studied area in 2004

深度/cm	5	10	30	50	70	100
观测点个数	8	8	8	8	8	8
RMSE/ %	6.08	2.18	3.19	3.21	3.79	1.54

表3显示不同深度土壤含水率模拟值与实测值的均方差(RMSE)，除地表深度5 cm的RMSE大于5%，其它深

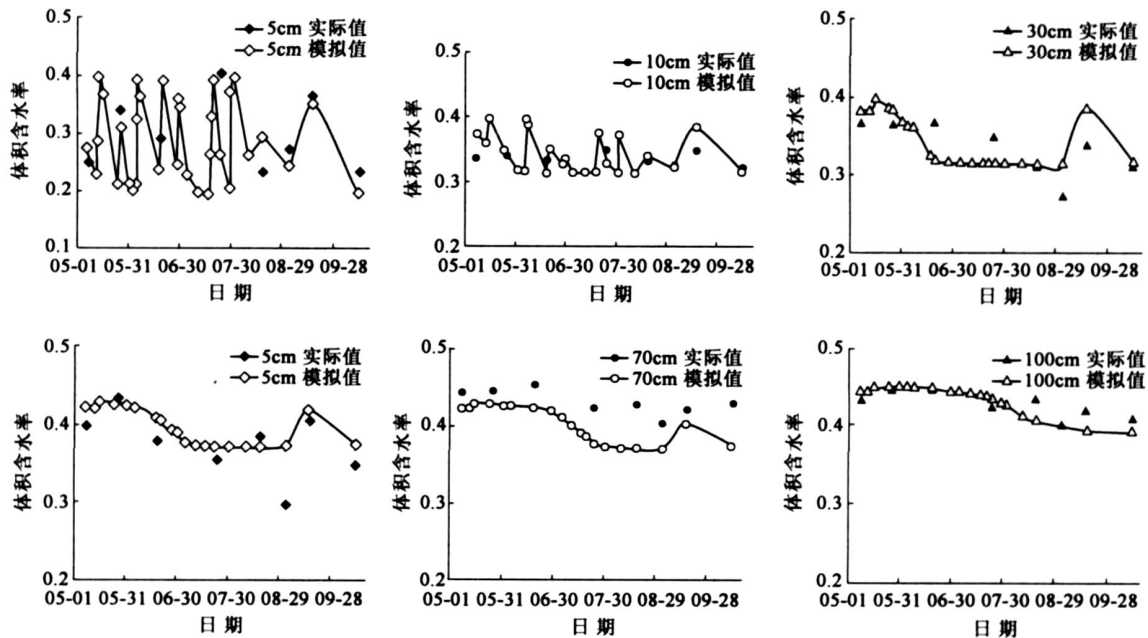


图1 研究区域2004年各监测深度土壤含水率模拟值与实测值

Fig. 1 Simulated and observed soil water content for every monitored layer of soil in the studied area in 2004

度的RMSE均小于5%外，说明模型检验效果较好。图1和图2分别显示土壤含水率和潜水埋深的模拟值与实测值，模型较好地反映出该试验区的实际情况，但SWAP在模拟灌溉和降雨等来水情况后的土壤含水率和潜水埋深的变化时与实际存在差距，这与试验区的土质复杂且分布不均有一定关系，且与SWAP模型本身的参数数目限制也有很大关系，如因土壤分层数目的限制，使得SWAP模型无法对根系层土壤详细划分和进行土壤水分的垂向的详细模拟，这在70 cm处土壤含水率模拟结果中有所反映。总体上看，可尝试用SWAP模型进行模拟和分析引水减少情况下田间水均衡要素变化。

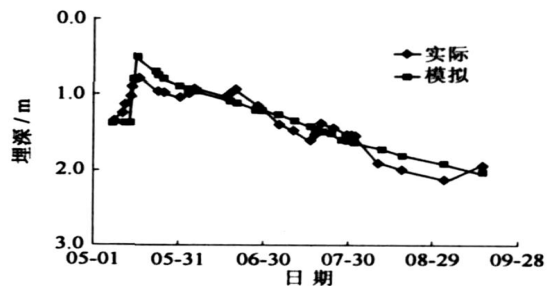


图2 研究区域2004年地下水埋深模拟值与实测值

Fig. 2 Simulated and observed underground water depth in the studied area in 2004

3 结果与分析

模拟结果(表 4 和图 3)显示,在作物生长期,随着总来水量(降雨、灌溉)减少,蒸散发量相应减少,但蒸散发量占总耗水量的比例始终不低于 90%。可见,河套地区耗水类型是以垂向的蒸散发为主。此外,土壤蒸发占蒸散发量的比例随来水减少也相应降低,说明在河套灌区的无效蒸发与来水量有一定关系,宜将大水漫灌调整为喷灌、滴灌灌溉模式才能有效控制引水量和提高灌溉效率。另外,在作物生长期的蒸散发量高于总来水量,说明蒸散发除消耗掉作物生长期的来水外,还消耗较多的根系层土壤储水,同时也说明河套灌区的秋浇不仅有洗盐功效,而且为翌年耕种土壤保墒也提供了保障。在水均衡其他耗水要素中,降雨截留量和排水沟排水量非常少,这与降雨稀少、大气蒸发量大、排水沟深度较浅等有关。对于潜水埋深的变化,从作物生长初期到中期,埋深处于 1.5 m 以上,此期间灌溉频繁,根系层土壤水分在蒸散发消耗和灌溉补给之间波动;但到中后期,埋深下降到 2 m 以下,根系层土壤储水在被蒸散发消耗后的灌溉补给很少,地下水通过潜水蒸发以补给根系层土壤水分,从而埋深下降。

表 4 研究区域两典型年 4 种灌溉方案的 SWAP 模拟结果

Table 4 Results of simulation for two typical years and four irrigation schemes in studied area by SWAP

模拟参数	平水年(5.1~10.13)灌溉方案(原灌溉量的百分比)				枯水年(5.1~10.13)灌溉方案(原灌溉量的百分比)			
	100%	80%	60%	0%	100%	80%	60%	0%
总来水量(降雨+灌溉)/mm	310.6	286.8	263.0	191.5	157.3	139.8	122.3	69.8
降雨/mm	191.5	191.5	191.5	191.5	69.8	69.8	69.8	69.8
灌溉/mm	119.1	95.3	71.5	0	87.5	70.0	52.5	0
土壤储水变化量/mm	-89.0	-89.3	-89.6	-89.6	-87.9	-87.9	-87.9	-87.8
总耗水量(ET+截雨+排水)/mm	399.6	376.1	352.5	281.1	245.1	227.7	210.2	157.6
蒸散发量(ET)/mm	378.3	357.6	334.4	263.0	235.0	217.6	200.1	147.4
作物蒸腾(T)/mm	264.2	245.3	230.3	190.6	169.6	159.0	143.6	117.3
土壤蒸发(E)/mm	114.1	112.3	104.1	72.4	65.4	58.6	56.5	30.1
降雨截留/mm	17.3	17.3	17.3	17.3	9.9	9.9	9.9	9.9
排水/mm	4.0	1.3	0.8	0.8	0.2	0.2	0.2	0.2
相对产量	0.41	0.38	0.36	0.3	0.23	0.21	0.19	0.16
土壤蒸发占蒸散发量的比例/%	30.2	31.4	31.1	27.5	27.8	26.9	28.2	20.4
蒸散发量占总耗水的比例/%	95.0	95.0	95.0	94.0	96.0	96.0	95.0	93.0

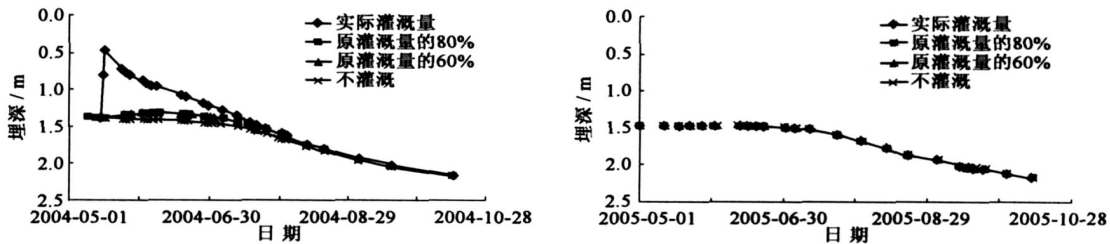


图 3 研究区域两个典型年生长期 4 种灌溉方案的地下水埋深 SWAP 模拟

Fig. 3 Simulation of underground water depth for two typical years and four irrigation schemes in the studied area by SWAP

对于产量分析,因试验数据有限,SWAP 模型的产量模拟参数采用了模型默认值,模拟的相对产量结果只能从趋势角度分析。若仅从平水年或枯水年看,当降雨相同时,随着引水减少,作物相对产量降低,这种变化在枯水年更为明显。在原灌溉方案中,枯水年的产量比平水年的产量低,除与来水量有关外,与降雨的时间分布也有很大关系。平水年的降雨时间分布在作物生长期的各个阶段,而枯水年的降雨时间很集中,在作物生长期大部分阶段没有降雨,如 2005 年作为枯水年,其生长期的降雨量只有 69.8 mm,而该年 7 月底的一场降雨就达 50 mm 以上,尽管雨量很大,但被作物利用非常有限。在实际调查中发现,2005 年实际产量低于 2004 年实际产量,而且有很多耕地的作物出现枯死。可见,当灌区多年平均用水量从 52 亿 m³ 减少到 40 亿 m³ 时,现有种植结构下的作物产量

将会受引水减少和气候不确定性的双重影响。因此,需考虑在引水量减少情况下的种植结构和灌溉制度。

4 结 论

SWAP 模型是一个模拟田间尺度土壤水、溶质、热量运移和作物产量的计算机模型,是土壤-大气-植物系统的集总式模拟。本文以河套灌区永联试验区的六队六八斗渠控制区域为研究区域,利用 SWAP 模型模拟分析了引水减少条件下的田间水均衡要素变化规律。模拟结果表明:河套灌区耗水类型是以垂向的蒸散发为主,蒸散发量占总耗水量的比例占 90% 以上,随着引水量减少,模拟的作物相对产量也显著降低。因此,引水减少后种植结构和灌溉制度需适度调整。

致谢:感谢河套灌区五原试验站徐建新、夏玉红、李慧琴和杨新荣在试验方面提供的帮助。

参考文献:

- [1] 樊军,王全九,邵明安.黄土高原水蚀风蚀交错区土壤剖面水分动态的数值模拟研究[J].水科学进展,2007,18(6):683-688.
(FAN Jun, WANG Quan-jiu, SHAO Ming-an. Numerical modeling of the soil-water dynamics in water-wind erosion crisscross region on the loess plateau[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(6): 683-688. (in Chinese))
- [2] van de SALM C, van DENIER der G H, WIEGERS R, et al. The effect of afforestation on water recharge and nitrogen leaching in the Netherlands[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 221:170-182.
- [3] SARWAR A, BASILAANSEN W G M, Feddes R A. Irrigation water distribution and long-term effects on crop and environment[J]. Agricultural Water Management, 2001, 50: 125-140.
- [4] van VOSSLEN A, VERLANCKE H, van RANST E. Assessing water consumption of banana: traditional versus modelling approach[J]. Agricultural Water Management, 2005, (74): 201-218.
- [5] van DAM J C, HUYGEN J, WESSELING J G, et al. Theory of SWAP version 2.0: Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment[M]. The Netherlands: Wageningen DLO Winand Staring Centre, 1997.
- [6] 杨树青.基于 Visual-MODFLOW 和 SWAP 耦合模型干旱区微咸水灌溉的水-土环境效应预测研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2005.(YANG Shu-qing. Study on water-soil environment response forecast in arid area under slight-salty irrigation based on coupled model of Visual-MODFLOW and SWAP[D]. Huhhot: Neimenggu Agriculture University, 2005. (in Chinese))
- [7] 王修贵.涝渍兼治农田排水及水管理理论与技术研究[D].武汉:武汉大学,2003.(WANG Xiu-gui. Study on theory and technology of farmland drainage and water management under waterlogging[D]. Wuhan: Wuhan University, 2003. (in Chinese))

Modeling influence of reduced irrigation water on water balance using SWAP*

JIANG Yan¹, WANG Xiu-gui², LIU Chang-ming¹, WU Xia-ning³

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. Sinohydro Corporation LTD, Beijing 100044, China)

Abstract: This paper analyzes the influence of reduced irrigation on water balance of farmland by the soil-water-atmosphere-plant (SWAP) Model. The experiment site is an area controlled by lateral canal in Hetao irrigation district of China. The results show that the ratio of evapotranspiration to total consumed water is over 90%, which further proves evapotranspiration is the leading water-consumed factor in Hetao irrigation district. The result also shows that relative production will fall evidently due to reduced irrigation water. Therefore, when the quantity of water allotted in Hetao irrigation district is cut down from 5.2 billion m³ to 4.0 billion m³, the pattern of crops and irrigation scheduling etc must be regulated newly.

Key words: SWAP model; reduced irrigation water; water balance

* The study is financially supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2006AA100207) and the National Natural Science of China (No. 50239090; 50809004).