

文章编号:1672-3317(2017)01-0001-08

# 河套灌区种植结构变化对农田系统水量平衡的影响

付雯琪, 翟家齐, 赵勇, 何国华, 张越

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:**种植结构调整是灌区农业节水的重要措施。1990年以来,河套灌区种植结构发生了剧烈变化,小麦等粮食作物种植面积大幅减小,葵花等经济作物种植面积大幅增加,对灌区水循环系统带来显著影响。针对这一问题,系统解析了灌区种植结构变化对农田系统的影响机制,采用阿维里扬诺夫经验公式、修正的Penman公式(1948)、Penman-Monteith公式(1973)等分别计算了河套灌区1990—2013年潜水蒸发量、蒸散耗水量等各水量平衡要素的变化情况,并从多个时间尺度分析了种植结构的变化对灌区农田系统水量平衡要素的影响。结果表明,①种植结构变化对垂向水量平衡要素蒸发耗水量和潜水蒸发量影响最为显著,其通量值明显减小;其次是对灌溉水量和田间入渗量的影响;对水平向水量平衡要素地表排水量影响最小。②潜水蒸发量、蒸发耗水量、灌溉用水量和田间入渗量在丰、平、枯3种典型年均呈不同程度的减小趋势,而地表排水量在不同水平年变化差异较大。③月尺度上,5月灌溉水量和6月潜水蒸发量与经济作物种植比例增加显著相关。④农田系统总输入水量与总输出水量总体呈下降趋势,水循环通量减小,水循环强度减弱。1990—2005年水分蓄变量整体呈现负平衡的状态,2006—2013年土壤层水分蓄变量为正,但由于实际土壤层增厚、土壤含水率仍然呈下降趋势。

**关键词:**种植结构;农田系统;水循环;水量平衡;河套灌区

中图分类号: S273

文献标志码: A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.01.001

付雯琪,翟家齐,赵勇,等.河套灌区种植结构变化对农田系统水量平衡的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(1):1-8.

## 0 引言

内蒙古河套灌区自秦汉时期就开始引水灌溉,是亚洲最大的一首制自流灌区,也是我国最重要的商品粮油基地之一<sup>[1]</sup>。从20世纪90年代以来,河套灌区小麦种植面积急速萎缩、葵花种植面积翻倍增长、玉米种植面积稳步增加,粮经比从7:3变为目前的4:6,种植结构发生了重大变化。目前国内外已经取得的研究表明,种植结构调整对提高区域水资源利用效率有重要意义<sup>[2-3]</sup>。高耗水、低效益的粮食作物种植面积逐步减小,低耗水、高效益的经济作物种植面积大幅增加时,灌溉需水量、农业用水量<sup>[4]</sup>及水资源消耗量<sup>[5]</sup>均表现出减小的态势,农业用水效率<sup>[6]</sup>和区域水资源利用效率<sup>[7]</sup>整体呈现增加的趋势。尤其是在水资源匮乏的农业灌区,种植结构调整已经成为深化农业节水<sup>[8]</sup>、缓解水资源紧缺<sup>[9]</sup>、解决水资源供需矛盾<sup>[10]</sup>的重要途径,是影响区域水循环过程的重要措施<sup>[2]</sup>。目前多数研究主要侧重于农田系统的用水项及耗水项分析,缺乏对农田系统整体水量平衡的定量解析。针对上述问题与需求,兹重点研究种植结构调整对农田水循环过程的影响,分析河套灌区种植结构变化对不同尺度农田系统水量平衡要素的影响,旨在为促进河套灌区种植结构优化及水资源合理开发利用提供一定参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

河套灌区位于内蒙古自治区西部,巴彦淖尔市南部,北纬40°19'—41°18',东经106°20'—109°19',如图1

收稿日期:2016-05-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51309249,51379216);水利部公益行业科研专项(201401041)

作者简介:付雯琪(1993-),女,陕西延安人。硕士研究生,主要从事水循环演变及驱动机制研究。E-mail:4700308@qq.com

通信作者:翟家齐(1984-),男,河南信阳人。博士,主要研究方向为流域水循环与物质循环模型、灌区节水潜力评估、区域干旱评估等。

E-mail:jiaqizhai@163.com

所示。灌区夏季高温干旱、冬季严寒少雪,年降雨量139~222 mm,其中70%集中在7—9月,暴雨较多,有效降水少;而蒸发能力高达2 400 mm左右,是降水量的10倍以上,无霜期短、封冻期长,是典型的温带大陆性气候。河套灌区水资源量由过境的黄河水、当地地表水资源和地下水资源组成,其中引黄灌溉用水占总灌溉水量的82.3%,无论从气候特征还是水资源条件来讲,河套灌区都是没有引黄灌溉就没有农业的地区。灌区现已形成完整的引排水渠系,包括总干渠、干渠、分干渠、支渠等7级引水渠系和总干沟、干沟、分干沟和支沟4级排水系统,从三盛公水利枢纽控制引水,经引水渠系到田间,再通过排水沟汇集进入总排干,大部分排水量直接排入乌梁素海,再通过西山咀排入黄河。

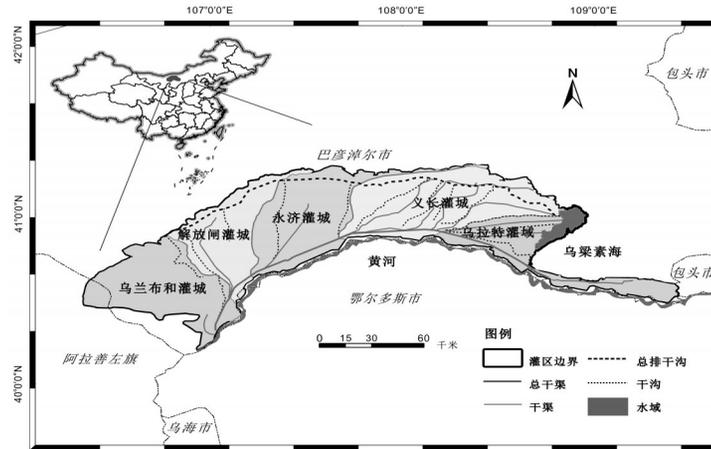


图1 河套灌区地理位置

## 1.2 数据来源

气象资料来源于中国气象科学数据共享网及巴彦淖尔市气象局提供的1990—2013年日气象资料,包括磴口、杭后、临河、五原、前旗、中旗、后旗等气象站监测的降水量、最高气温、最低气温、平均气温、相对湿度、风速、日照时间等监测指标。引、排水及灌溉信息来源于内蒙古河套灌区管理总局监测资料,包括各引、排水断面1990—2013年月过程数据,井灌及地表水灌溉1990—2013年月过程数据。灌区作物信息来源于巴彦淖尔市农牧局统计资料,包括小麦、玉米、葵花和番茄等作物1990—2013年种植面积年过程数据和各灌域灌溉制度等。

## 1.3 研究方法

以农田土壤层作为平衡体,河套灌区农田水量平衡系统输入项包括田间灌溉水量、降水量、潜水蒸发量,输出项包括蒸发耗水量、农田排水量和田间入渗补给量,水量平衡方程为:

$$\Delta W = W_{IR} + W_p + W_E - W_C - W_D - W_I \quad (1)$$

$$W_{IR} = W_{YIR} \times \eta_{CS} + W_{WIR} + W_{SIR} \quad (2)$$

式中: $W_{IR}$ 为田间灌溉水量; $W_p$ 为降水量; $W_E$ 为潜水蒸发量,采用阿维里扬诺夫经验公式<sup>[11]</sup>计算; $W_C$ 为蒸发耗水量,包括棵间蒸发、植被蒸腾、植被截留蒸发3部分,分别采用修正的Penman公式(1948)<sup>[12]</sup>、Penman-Monteith公式(1973)<sup>[13]</sup>、Noilhan Planton模型(1989)<sup>[14]</sup>模拟计算; $W_D$ 为农田排水量; $W_I$ 为田间入渗补给量; $W_{YIR}$ 为引黄水量; $\eta_{CS}$ 为渠系水利用系数; $W_{WIR}$ 为地下水井灌溉水量; $W_{SIR}$ 为当地地表水灌溉水量。

## 2 种植结构调整对农田水循环系统的影响机制

### 2.1 灌区农田水系统循环过程及其影响因素

灌区农田水系统是一个典型的“自然-社会”二元水循环结构,受自然、社会的双重驱动作用影响,农田水循环系统一方面遵循着蒸发蒸腾、入渗、产汇流等自然水循环机理与过程,另一方面又在人类活动的供水、用水、耗水、排水、补水过程中改变循环通量数量或产汇流方向。其中,人类活动对灌区水系统的影响主要表现在农田耕种、引水和排水等,例如灌区水循环中的取水-输水-用水过程不仅改变了水循环的蒸发、入渗、产流过程与通量,而且形成了完全逆于自然产汇流的过程,水由原来在河道中的汇流过程变成水量逐步分散的过程,农田排水由最末一级排水沟向干沟汇流的过程也完全受人工控制。但是,灌区水循环过程的改变仅是各循环通量数量和时空分布的变化,而水循环的转换机理仍然遵循自然水循环机理。

图2是一个典型灌区水循环过程示意图,灌区水系统涉及大气水、地表水、土壤水、地下水和植物水的相互转化,形成了供水、用水、耗水、排水、补水5大关键过程。其中,供水是指从当地地表水、地下水、入境河流等水源,通过蓄水、引水、提水等水源工程向灌区提供的水量。用水是指研究对象通过人工供水设施获得的水量,根据不同的研究尺度略有差异,在农田尺度是指进入田间地块的水量,在灌区尺度是指通过引水渠首闸门进入灌区的水量。耗水是指农田蒸发消耗的水量,包括裸间蒸发、植被蒸腾和植被截留蒸发3部分。排水是指灌溉地表退水、地下水排泄和降水径流通过排水渠系或天然河道流出的水量,可作为河湖湿地生态补水水源或直接排入下游。补水是指未被消耗的灌溉水量和当地降水量通过渠系渗漏、土壤入渗回补地下水的水量。通过对灌区水循环过程的解析可以看出,降水、气温、太阳辐射、地形地貌等自然因素以及灌溉引水、渠系改造、种植结构、灌溉制度、农艺技术、水价等社会因素是影响和驱动农田水循环过程的主要因素。

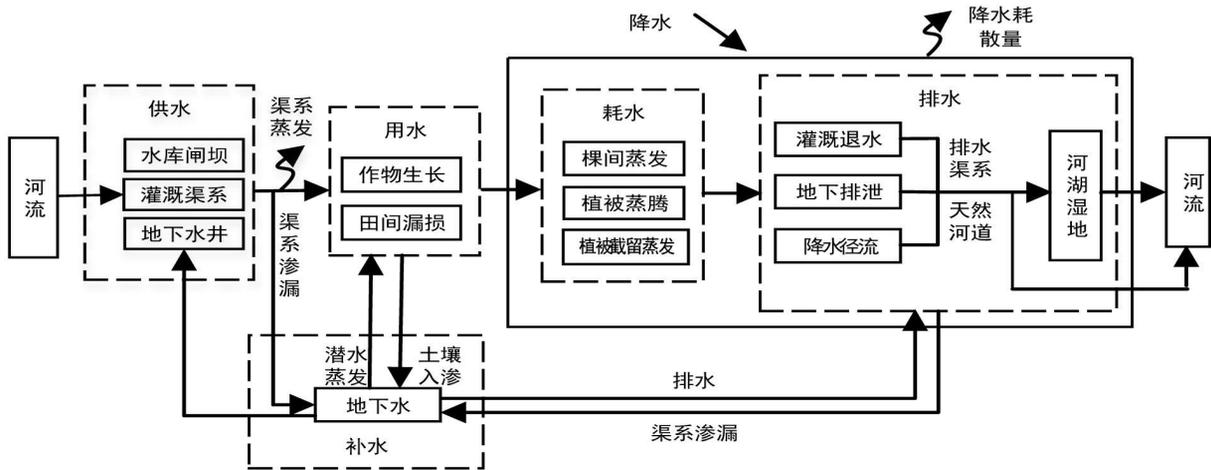


图2 灌区农田水系统循环过程示意图

## 2.2 种植结构变化对农田水系统的影响

由于不同作物的生长周期、水分需求和灌溉制度存在显著差异,意味着不同种植结构的耗水与灌溉需水的通量及时空分布将发生重大变化,进而对灌溉引水、排水及补水过程带来新的变化。我国主要作物生育期需水及净灌溉需水情况如表1所示。水稻和棉花全生育期需水量最大,净灌溉需水量也相对较高,灌溉依赖程度强;小麦全生育期需水量总体小于水稻和棉花,但因需水高峰期与降水高峰期不重合,净灌溉需水量反而与水稻和棉花接近;玉米生长期与雨季重合,净灌溉需水量小,是灌溉依赖程度较低的粮食作物;而葵花和大豆等经济作物耗水量小,净灌溉需水量低,农业经济效益也相对较高。

表1 不同作物生育期及灌溉需水量

作物	全生育期需水量/mm	全生育期/d	需水高峰期	净灌溉需水量/mm
小麦	350~600	100~130	出苗(4月初)—开花(6月初)	200~550
玉米	300~400	90~100	开花(7月中下旬)—乳熟(8月中旬)	100~200
水稻	500~750	90~150	拔节(7月初)—开花(8月中旬)	200~500
棉花	500~800	150~180	花铃期(7月中旬—8月底)	150~460
葵花	350~400	90~130	现蕾(7月中旬)—开花(8月中旬)	100~200
大豆	400~500	100~130	开花(6月中旬)—结实(8月上旬)	100~250

注 表中的数据参考文献[15-21]。

减少全生育期耗水量大、净灌溉需水量高的作物种植面积,能够直接降低区域净灌溉需水量和农业耗水量,形成减少农业灌溉水量的效果;而增加灌溉依赖程度低的作物种植面积,作物生长更多依赖于天然降水,能够有效缓解区域灌溉供需矛盾,降低农业耗水量和农业灌溉水量。因此,在水资源紧缺和社会经济效益等因素的综合驱动下,我国农田灌区的种植结构已经呈现出灌溉依赖程度低、耗水量小、经济效益高的作物种植比例逐渐增加,灌溉依赖程度低、耗水量大、经济效益低的作物产区面积稳步减少的趋势<sup>[22]</sup>,如宁夏平原水稻种植面积减小后,作物蒸发耗水量减少了1.02亿 $m^3$ <sup>[2]</sup>;滇中经济区限制水稻种植面积,上调豆类、蔬菜等经济作物比例后,农业灌溉水量减小,节水率达到19.7%<sup>[8]</sup>;河西地区通过大力缩减高耗水作物种植面积,增加经济作物种植面积,农业用水量15 a间减少了4.74亿 $m^3$ <sup>[23]</sup>。而在国外,种植作物调整同样被视为解

决农业水资源短缺的关键措施<sup>[3]</sup>,如美国加州地区通过大力推进抗旱能力强、产品附加值高的杏、葡萄、芦荟等作物解决水资源匮乏的问题<sup>[24]</sup>;印度奥里萨邦镇1971—2008年水稻种植比例减少了16%,油菜籽种植比例增加了4%,豆类种植比例增加了11.5%,农业水分生产效率由28%提高到37%<sup>[25]</sup>。

随着种植结构调整和优化力度的增强,在降低农业耗水量和灌溉用水量的同时,也会对农田水系统带来影响,如渠系渗漏和土壤入渗补给水量减小,地下水补给量缩减,地下水位降低,潜水蒸发量和农田排水量减小,整个农田水系统各个要素均发生变化,甚至会导致区域水循环过程及水资源利用方式发生重大改变。

### 3 不同种植结构条件下河套灌区农田系统水量平衡变化

#### 3.1 河套灌区种植结构变化

长期以来,河套灌区农业种植以粮食为主,主要有小麦、玉米等,经济作物主要是葵花、甜菜、番茄等,1990年粮经比为72:28。图3为河套灌区1990—2013年主要作物种植面积变化图,可以看出,近20 a间河套灌区种植结构发生剧烈变化,从小麦和玉米等粮食作物为主快速转变为以葵花和番茄(只有2005年之后的数据,故在图中没有显示)等经济作物为主,2013年经济作物已经占到灌区作物的65%左右。1997年之前,灌区种植结构总体保持稳定;1998年开始,随着全国大型灌区节水改造工程逐步实施,灌区葵花种植面积快速增加,3 a间种植面积增加1倍以上,与此同时小麦种植面积开始减少并快速下滑,玉米种植面积小幅增加。2003年,黄河上游来水量锐减,小麦种植面积出现断崖式下跌,仅9.336万hm<sup>2</sup>,葵花种植面积则大幅增加,达到18.946万hm<sup>2</sup>,并首次超过小麦成为河套灌区第一大种植作物。2006年开始,葵花种植面积出现新一轮快速增长,到2013年葵花种植面积已经达到26.623万hm<sup>2</sup>,占灌区作物种植面积的50%,远超过小麦、玉米的种植面积;而在此期间,小麦种植面积则持续快速减少,到2013年仅有4.175万hm<sup>2</sup>,占比不足8%,降为灌区第3大种植作物。玉米种植面积在近20 a间保持稳定增长态势,从1990年的4.075万hm<sup>2</sup>发展到13.276万hm<sup>2</sup>,增加了2倍,成为灌区第二大种植作物。

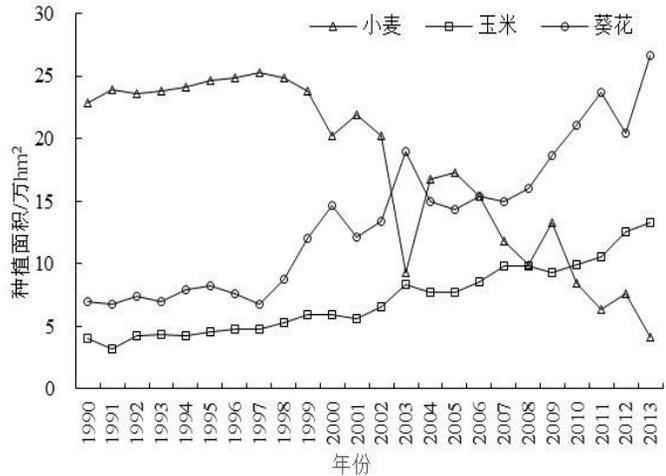


图3 河套灌区1990—2013年主要作物种植面积变化

#### 3.2 种植结构变化对不同时间尺度农田系统水量平衡的影响

##### 3.2.1 多年尺度影响分析

表2为河套灌区水量平衡要素多年尺度变化情况。1998年以前河套灌区种植结构基本稳定,1998—2005年处于增长起步期,2006—2013年处于快速增长期,将1990—1997年作为基准参考,通过对比分析种植结构调整对灌区水系统的影响。

表2 河套灌区农田系统水量平衡要素多年尺度变化

时间	输入要素				输出要素				蓄变量
	灌溉水量	降水量	潜水蒸发量	小计	地表排水量	蒸发耗水量	入渗	小计	
1990—1997年	26.40	9.66	8.36	44.41	1.01	37.72	6.02	44.75	-0.34
1998—2005年	26.10	8.27	7.74	42.11	1.15	34.51	7.23	42.89	-0.79
2006—2013年	25.74	9.38	7.08	42.19	1.15	34.35	6.24	41.75	0.44
多年平均	26.08	9.10	7.72	42.90	1.10	35.53	6.50	43.13	-0.23

从表2可以看出,蒸发耗水是水平衡系统的主要输出项,占总输出的82.4%,近20 a间,蒸发耗水量显著降低,1998—2005年比1990—1997年减少3.19亿m<sup>3</sup>,但此后蒸发耗水量下降趋势变缓,2006—2013年较1998—2005年减少了0.16亿m<sup>3</sup>。与基准期(1990—1997年)相比,1998—2005年农田灌溉水量平均减少0.3亿m<sup>3</sup>,2006—2013年平均减少0.66亿m<sup>3</sup>。潜水蒸发量是水平衡系统输入项中变化较为显著的要素,主

要受地下水埋深及地表植被覆盖情况的影响,2006—2013年较1990—1997年减少1.28亿m<sup>3</sup>,平均每年下降1.1%。田间蒸散耗水的改变对田间入渗量也产生一定的影响,随着地下水位的下降,入渗量也呈减小趋势,特别是从1998年开始,呈直线下降趋势,平均每年减小1.4%。种植结构调整对地表排水量影响较小,河套灌区1995年总排干沟扩建工程完工,1998年开始建设渠系配套工程和节水改造工程,排水渠系畅通、渠系水利用系数提高,排水量反而总体呈现增加趋势。

从农田水系统总体平衡来看,总输入水量总体呈下降趋势,其中2006—2013年比1990—1997年减少2.22亿m<sup>3</sup>,由于当地降水及黄河来水偏枯,1998—2005年农田系统总输入水量最少,为42.11亿m<sup>3</sup>。总体输出水量下降趋势更为显著,2006—2013年比1990—1997年减少3.0亿m<sup>3</sup>。蓄变量方面,2005年之前的2个时间段土壤层蓄变量为负值,说明土壤层水分处于持续亏缺状态,这与灌区连续遭遇干旱有很大关系。2006—2013年土壤层水分蓄变量为正值,主要是由于地下水的持续下降,地下水埋深从早期的1.6 m增加到目前的2.0 m左右,土壤蓄水空间显著增大,入渗补给地下水量明显减小,土壤水资源量增加。但是,从土壤含水率来看,实际仍然呈下降趋势。

### 3.2.2 典型年影响分析

为了剥离降水变化对农田水系统的影响,选取降水总量和分布相当、种植结构差异显著的年份进行典型年对比分析,分别对丰水年、平水年和枯水年进行计算,结果如表3所示。从表3可以看出,降水量占总输入水量的21.2%,其丰枯变化和时程分配会对灌区农田系统水量平衡有较大影响。在降水条件相似的情况下,经济作物比例显著增加后,丰、平、枯3种年型的灌溉用水量、潜水蒸发量、蒸发耗水量、入渗补给量4种水量平衡要素均呈现不同程度减小,其中潜水蒸发量变化速率最快,平均为-16.3%;蒸发耗水量和田间入渗量次之,平均减小6%~7%;灌溉用水量变化率较小,平均减小2.5%。地表排水量受种植结构影响较小,丰水年和枯水年排水量增加,平水年与之相反。除丰水年水分蓄变量为正且持续增加之外,平水年、枯水年灌区水系统均呈现负水平衡的状态,蓄变量持续减小。

表3 河套灌区农田系统不同典型年水量平衡要素变化

年型	年份	经济作物 比例/%	输入要素/亿m <sup>3</sup>				输出要素/亿m <sup>3</sup>				蓄变量/ 亿m <sup>3</sup>
			灌溉用水量	降水量	潜水蒸发量	小计	蒸发耗水量	地表排水量	入渗补给量	小计	
丰水年	1995	31.1	26.18	12.80	8.35	47.33	38.13	1.08	6.99	46.2	1.13
	2008	59.3	25.13	10.31	6.48	41.92	34.08	1.68	6.29	42.05	4.19
平水年	1996	30.2	25.99	8.61	8.01	42.61	36.13	1.13	7.31	44.57	-1.97
	2001	43.3	25.68	8.19	7.75	41.62	36.12	0.97	7.27	44.36	-2.74
枯水年	1993	27.0	27.07	6.43	8.87	42.37	37.80	1.10	6.73	45.63	-3.25
	2011	66.0	26.45	6.18	6.81	39.44	35.13	1.55	6.07	42.75	-3.32

### 3.2.3 月尺度影响分析

河套灌区的雨季在7—9月,降水量占全年的70%以上,农作物生长灌溉期主要在4—9月,其中小麦灌溉期为5月初—6月底,灌溉定额为3 765 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,灌溉需水量大,灌溉依赖程度高;玉米灌溉期为6月底—7月底,灌溉定额为3 210 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,葵花灌溉期为7月中旬—7月底,灌溉定额为2 520 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,灌溉需水量小,雨热同期。受降水、作物生长期及灌水量等因素在时间分布上的影响,灌区农田水系统平衡状态在年内也存在显著的差异,各水量平衡要素生长期逐月变化情况如表4所示。

种植结构调整后,除4、7月灌溉水量仍然呈增加趋势,其余月份均呈下降趋势,5月灌溉水量减少与经济作物种植比例增加的相关程度最高,如图4(a)所示,决定系数为0.740 8。潜水蒸发量在4—9月均呈下降趋势,其中6、7月年平均减少速率最快,分别为1.7%、1.4%。蒸发耗水量除在8月呈上升趋势之外,其他月份均呈下降趋势,平均每年降低0.5%,6月份蒸发耗水量与种植结构变化相关程度最高,如图4(b)所示,决定系数为0.617 6。地表排水量中,7、8月排水量占整个生长期排水量的64%,总体呈增加趋势,其他月份均表现出减小的趋势。田间入渗补给量从1998年之后均表现出减小的趋势。从水分蓄变量来看,4—8月总体呈负水平衡的状态,9月水分蓄变量为正,只有4、6月输入输出水量差额逐渐减小,其他月份负水状态都在逐渐加重。

表4 河套灌区农田系统月水量平衡要素

亿 m<sup>3</sup>

平衡要素	时间	4月	5月	6月	7月	8月	9月	
输入要素	灌溉水量	1990—1997年	1.27	6.24	4.24	4.14	1.40	1.93
		1998—2005年	1.64	5.33	4.09	4.06	1.35	1.81
		2006—2013年	1.56	5.16	3.71	4.39	1.37	1.65
	降水	1990—1997年	0.11	0.63	0.91	2.50	3.33	0.85
		1998—2005年	0.33	0.93	1.19	1.91	1.89	1.54
		2006—2013年	0.10	1.05	2.13	1.55	2.18	1.64
	潜水蒸发	1990—1997年	0.06	0.22	1.64	2.14	1.14	0.87
		1998—2005年	0.07	0.23	1.40	2.01	1.05	0.74
		2006—2013年	0.06	0.21	1.25	1.67	1.01	0.65
小计	1990—1997年	1.44	7.10	6.78	8.79	5.87	3.65	
	1998—2005年	2.05	6.48	6.68	7.97	4.30	4.09	
	2006—2013年	1.72	6.42	7.09	7.61	4.57	3.94	
输出要素	蒸发耗水	1990—1997年	2.82	6.71	8.76	7.62	3.99	2.62
		1998—2005年	2.88	5.79	7.61	7.07	3.91	2.06
		2006—2013年	2.62	5.83	6.94	6.84	4.39	2.36
	地表排水	1990—1997年	0.0002	0.017	0.023	0.053	0.006	0.002
		1998—2005年	0.0004	0.029	0.019	0.063	0.009	0.008
		2006—2013年	0.0002	0.010	0.009	0.070	0.010	0.001
	田间入渗	1990—1997年	0.52	1.46	1.16	0.94	0.52	0.41
		1998—2005年	0.73	1.93	1.36	1.04	0.58	0.46
		2006—2013年	0.64	1.75	1.20	0.92	0.49	0.39
小计	1990—1997年	3.34	8.18	9.94	8.61	4.51	3.03	
	1998—2005年	3.62	7.75	8.99	8.18	4.50	2.53	
	2006—2013年	3.26	7.59	8.15	7.84	4.89	2.76	
蓄变量	1990—1997年	-1.89	-1.08	-3.16	0.17	1.35	0.62	
	1998—2005年	-1.57	-1.27	-2.31	-0.21	-0.21	1.57	
	2006—2013年	-1.54	-1.17	-1.06	-0.23	-0.32	1.19	

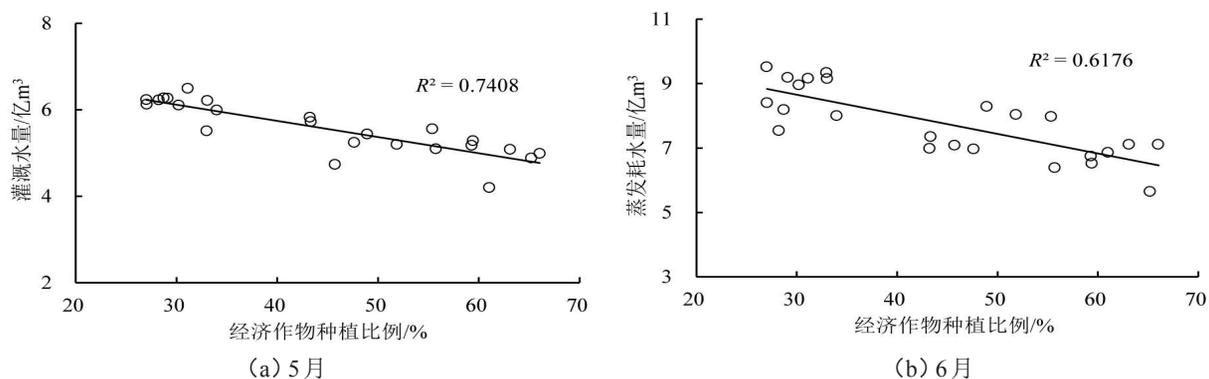


图4 月尺度水平衡要素与种植结构相关关系图

### 3.3 讨论

在水资源严重短缺以及最严格水资源管理制度的约束下,河套灌区种植结构调整是在保障粮食安全的基础上,实现水资源可持续利用、建设节水型农业的重要措施。但是种植结构调整与农产品市场需求、农民年龄及节水意识、政府参与支持程度、上一年种植作物种类有较大关系,即便在新的种植结构模式下,受黄河水资源统一调度、本地降水丰枯等因素的影响,农田灌溉用水等水量平衡要素发生显著变化需要一定的反馈响应时间,如何准确量化表达种植结构变化与各水量平衡要素的影响仍然是一个难点。

从长远来看,随着节水型种植结构的进一步优化,灌区农田灌溉水量、潜水蒸发量、蒸发耗水量、田间入渗量必将持续减小,水资源利用效率提高。但与此同时,地下水位也会随着灌溉水量、地下水入渗补给量等要素的减少而降低。1990—2013年河套灌区地下水埋深已经呈现波动下降趋势,降幅为0.3~0.4 m,这对作

物生长及农业可持续发展十分不利。因此,种植结构进一步调整的同时,还需重点考虑地下水资源及区域生态环境的保护。

## 4 结论

种植结构调整对农田系统水循环过程及水量平衡有重要影响。分析灌区农田水循环系统的过程及种植结构对水系统的影响,并在解析河套灌区1990—2013年种植结构变化情况的基础上,从多年尺度、典型年尺度和月尺度分析了灌区种植结构对水量平衡要素的影响,初步结论主要有:

1)垂向水量平衡要素蒸发耗水量和潜水蒸发量受种植结构调整影响最大。2006—2013年蒸发耗水量较1990—1997年减少3.37亿 $m^3$ ,1990—2013年潜水蒸发量平均每年下降1.1%,二者分别是水量输出输入项中变化最显著的要素。农田蒸散耗水量大幅变化也在一定程度上影响着灌溉水量和田间入渗量的变化,灌溉水量在2006—2013年减小速率最大,平均每年降低0.6%,田间入渗量则从1998年起直线下降。水平向水量平衡要素地表排水量受种植结构影响较小,由于灌区渠系建设和节水改造改善了排水条件,排水量反而呈上升趋势。

2)降水量占灌区总输入水量的21.2%,其丰枯变化和时程分配对农田水量平衡系统有较大影响。潜水蒸发量、蒸发耗水量、灌溉用水量和田间入渗量在丰、平、枯3种典型年均呈不同程度的减小趋势,而地表排水量在不同水平年变化差异较大。

3)各平衡要素在农作物主要生长灌溉期4—9月变化趋势差异较大,增减不一。其中5月灌溉水量和6月潜水蒸发量的减小与经济作物种植比例增加相关程度最高,决定系数分别为0.7408、0.6176。

4)河套灌区农田系统总输入水量与总输出水量总体呈下降趋势,水循环通量减小,水循环强度减弱。1990—2005年水分蓄变量整体呈现负水平衡的状态,土壤水资源持续亏缺。2006—2013年土壤层水分蓄变量为正,主要是由于地下水的持续下降使得土壤层变厚,土壤蓄水空间显著增大,入渗补给地下水量明显减小,土壤水资源量增加,但土壤含水率仍呈下降趋势。

### 参考文献:

- [1] 岳勇,郝芳华,李鹏,等.河套灌区陆面水循环模式研究[J].灌溉排水学报,2008,27(3):69-71.
- [2] 张金萍,裴源生,郭兵托,等.种植结构调整对区域水循环的影响分析[J].干旱区地理,2011,34(1):26-33.
- [3] JURY W A, VAUX H J. The Emerging Global Water Crisis: Managing Scarcity and Conflict Between Water Users [J]. Advances in Agronomy, 2007, 95: 1-76.
- [4] 马育军,朱南华诺娃,王小醒.北京市粮食作物种植结构调整对水资源节约利用的贡献率研究[J].灌溉排水学报,2015,34(8):1-6.
- [5] 张金萍.宁夏平原种植结构调整对农业用水的影响分析[J].干旱区资源与环境,2012,26(8):57-61.
- [6] RACHID F, SAID W, FATIMA A, et al. Response of Quinoa to Different Water Management Strategies: Field Experiments and Saltmed Model Application Results [J]. Irrigation and Drainage, 2015, 64: 29-40.
- [7] 张金萍,郭兵托.宁夏平原区种植结构调整对区域水资源利用效用的影响[J].干旱区资源与环境,2010,24(9):22-26.
- [8] 解桂英,赵绍熙,陈刚,等.水资源约束条件下滇中经济区农业种植结构调整研究[J].灌溉排水学报,2008,23(2):25-31.
- [9] 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.
- [10] KUMAR M D, SIVAMOCHAN M V K, NARAYANAMOORTHY A. The Food Security Challenge of the Food-Land-Water Nexus in India [J]. Food Security, 2012, 4(4): 539-556.
- [11] 阿维里扬诺夫.防治灌溉土地盐渍化的水平排水设施[M]. 姜溥礼,译.北京:中国工业出版社,1963.
- [12] Penman H L. Natural Evaporation From Open Water, Bare Soil and Grass [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1948, 193(1032): 120-145.
- [13] MONTEITH J L. Principles of Environmental Physics [M]. Edward Arnold, 1973.
- [14] MONTEITH J, PLANTON S A. Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models [J]. Mon Wea Res, 1989, 117: 536-549.
- [15] 刘钰,汪林,倪广恒,等.中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J].农业工程学报,2009,25(12):6-12.
- [16] 鹿强,周和平.干旱区农业灌溉用水定额研究[J].中国水利,2011(21):45-46.
- [17] 刘宏谊,马鹏里,杨兴国,等.甘肃省主要作物需水量时空变化特征分析[J].干旱地区农业研究,2004,23(1):39-44.
- [18] 刘广明,杨劲松,姜艳,等.节水灌溉条件下水稻需水规律及水分利用效用研究[J].灌溉排水学报,2005,24(6):49-52.
- [19] 张振华,蔡焕杰,杨润亚,等.沙漠绿洲灌区膜下滴灌作物需水量及作物系数研究[J].农业工程学报,2004,20(5):97-100.

- [20] 段佩利,秦丽杰.不同降水年型下长岭县向日葵需水规律研究[J].中国农学通报,2014,30(6):135-139.
- [21] 刘钰,谭军利,李王成,等.吉林四平地区玉米和大豆灌溉需水量分析[J].南水北调与水利科技,2015,13(6):97-100.
- [22] 李玉敏,王金霞.农村水资源短缺:现状、趋势及其对作物种植结构的影响——基于全国10个省调查数据的实证分析[J].自然资源学报,2009,24(2):200-208.
- [23] 郭晓东,陆大道,刘卫东.节水型社会建设背景下区域节水措施及其效果分析[J].干旱区资源与环境,2013,27(7):1-6.
- [24] 李玉义,逢焕成,王婧,等.中国节水农作制度发展趋势探讨[J].中国农业大学学报,2010,15(3):88-93.
- [25] REDDY A A. Agricultural Productivity Growth in Orissa, India: Crop Diversification to Pulses, Oilseeds and Other High Value Crops [J]. African Journal of Agricultural Research, 2013, (8)19: 2 272-2 284.

## Effects of the Planting Structure Adjustment on Water Budget of Field System in Hetao Irrigation Area

FU Wenqi, ZHAI Jiaqi, ZHAO Yong, HE Guohua, ZHANG Yue

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,  
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The adjustment of local planting structure is an important measure of agricultural water-saving in an irrigation area. Since 1990 the planting structure in Hetao irrigation area has changed dramatically, the planting area of wheat and other food crops have drastically reduced, while the planting area of sunflower and other cash crops have sharply increased. This great change has brought significant impacts on water cycle system in irrigation area. Based on the processes of water cycle system, the influencing mechanism behind the effects of the planting structure adjustment on the field system and water budget elements in Hetao irrigation area on multiple time scales were analyzed. The change of phreatic evaporation, water consumption of evaporation and other water budget elements from 1990 to 2013 were calculated by using Aver'yanov's formula, modified Penman formula(1948), and Penman-Monteith formula(1973). The results showed that, ①the water consumption of evaporation and the phreatic evaporation, these two vertical water balance elements were greatly influenced by the changing planting structure, and their flux values reduced remarkably. Furthermore, the influences on irrigation water and infiltration water were weaker. As for horizontal water balance element, the influence on surface displacement was the weakest. ②Whether in high flow, low flow or normal years, phreatic evaporation, water consumption of evaporation, irrigation water and infiltration water decreased at the different degrees, while surface displacement performed differently on different typical years. ③On monthly scale, irrigation water in May and phreatic evaporation in June had strong relationships with the increasing cash crops. ④Both of the total input and output water in field system descended, meanwhile the flux and intensity of water cycle reduced. Water storage was in a negative balance state during 1990—2005. During 2006—2013, water storage was in a positive balance state, nevertheless, the soil moisture was still falling, which resulted from thickness in soil layer.

**Key words:** planting structure; field system; water cycle; water budget; Hetao irrigation area

责任编辑:赵宇龙