

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200142

甘肃省黄河流域典型灌区耗水系数试验研究

王汉卿,王海荣

(甘肃省临洮水文水资源勘测局,甘肃 临洮 730500)

摘要:以甘肃省黄河流域为研究区,选择洮河自流引水灌区洮惠渠、泾河自流引水加井灌区泾河南干渠、内陆河高扬程景电灌区,进行引退水量、土壤含水量、农作物生长监测,采用“引排差”与“VSMB模型”相结合方法开展典型灌区耗水系数试验研究。通过监测试验基本掌握典型灌区灌溉引、排关系,计算得出甘肃省黄河流域灌区耗水系数。研究成果可为其它相似灌区的农业耗水研究提供参考,同时也为今后黄河流域和甘肃省水资源公报编制工作提供技术支持。

关键词:典型灌区;典型地块;引排差法;VSMB模型;耗水系数;黄河流域;甘肃省

中图分类号:TV93 **文献标识码:** A **文章编号:**1000-0852(2021)04-0021-07

0 引言

耗水系数是评价流域用水消耗程度的关键指标,表征了区域或流域取水消耗程度的高低。本文界定的耗水量为农田灌溉耗水量,耗水系数等于耗水量除引水量。国内外对耗水量和耗水系数的定义主要有四种类型:一是 Israelsen O W^[1]提出的“水分利用效率”、“有效效率”、“灌溉水利用系数”,从水资源总量定义消耗,表达与耗水相关的水量比例指标;二是陈玉民^[2]等提出的“耗水系数”,从经济产出定义消耗,表达水分生产率指标;三是朱永霞^[3]提出的“水能循环消耗效率”,从社会产出定义消耗,表达社会水循环中耗水效率指标;四是《黄河流域水资源调查评价》^[4]采用的“流域耗水率”、《黄河流域水资源综合规划(2012~2030年)》^[5]采用的“地表水消耗率”,从水资源循环的流域属性,表达耗水效率的指标。目前对于黄河流域耗水量和耗水系数不同部门、不同计算方法,结果存在差异,各市(县)的实际耗水量难以确定,给黄河流域取水总量控制和取水许可管理的具体实施带来困难,对流域水资源开发利用控制红线的制定和考核产生了影响。因

此,本文选定研究区开展耗水系数相关试验,以期对落实最严格水资源管理制度、实现流域水资源管理目标提供参考。

1 研究区概况

研究区为黄河流域甘肃省灌区,万亩以上灌区主要集中在甘肃省临夏州、定西市、兰州市、白银市、天水市、平凉市和庆阳市的33个县(区),分布范围较广。研究区内建设的灌区有提水、自流引水、井灌和其它4种类型,其中灌溉类型以提水和自流引水为主。灌区总引水量 $23.75 \times 10^8 \text{m}^3$,总有效灌溉面积 $37.03 \times 10^8 \text{m}^2$,实际灌溉面积 $31.48 \times 10^8 \text{m}^2$ 。这些灌区的建设与投入运行,不仅解决了研究区内相关区域水资源严重短缺的问题,而且解决了人畜饮水困难和农田灌溉问题。研究区见图1。

1.1 灌区及取水

据文献^[6]统计,研究区内不同类型灌区333个,其中提水105个、自流引水209个、井灌4个及其它类型15个。自流引水和提水这两种类型有效灌溉占总有效灌溉面积的91.8%,占总引水量的95.8%(见表1)。

收稿日期:2020-03-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41271092)

作者简介:王汉卿(1981—),男,甘肃会宁人,高级工程师,主要从事水文水资源方面的工作。E-mail:wanghanqing2012@163.com

通信作者:王海荣(1971—),男,甘肃岷县人,高级工程师,主要从事水文水资源、水质化验方面的工作。E-mail:1165530070@qq.com

1.2 研究区种植结构

据文献[7],研究区 2018 年农作物 294.7×10⁸m²,粮食作物 204.4×10⁸m² 占 69.4%、油料 22.8×10⁸m² 占 7.7%、中药材 35.8×10⁸m² 占 12.1%、果蔬 20.2×10⁸m² 占 6.9%、其它 11.4×10⁸m² 占 3.9%。可知研究区粮食作物种植面积最大,接近农作物总面积的 70%。

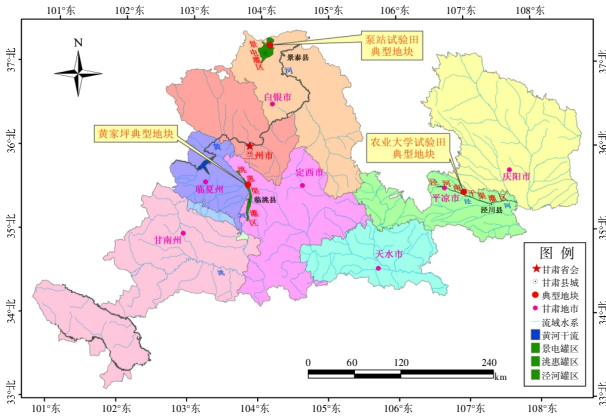


图1 研究区示意图
Fig.1 Sketch map of study area

1.3 典型灌区

研究区灌区数量较多,选取典型灌区进行研究,选取时考虑灌区规模、灌溉水源、农业结构、主要农作物类型、灌区集中度、灌区试验条件等综合因素,最终确定洮惠渠、泾河南干渠、景电作为典型试验灌区(见表2)。

1.4 典型地块

典型地块的选取时考虑代表性、完整性、引(退)水控制性和交通便利性等因素,经现场调研查勘,最后确定3处(见表3)。

2 灌区监测试验

2.1 方法及原理

灌区监测通常采用数值模拟法^[8]、水文站控制法(河段差)^[9]或节点控制法(引排差)^[10],经比较分析后采用“引排差”法进行监测试验计算耗水系数,并通过模型模拟土壤水平衡方程对监测试验耗水系数进行验证。

2.1.1 引排差法

《中国水资源公报编制技术大纲》^[11]中要求,灌溉

表1 研究区水源类型、灌溉面积及取水统计

Table1 Water source type,irrigation area and water intake statistics in the study area

水源类型	数量/个	有效灌溉/10 ⁸ m ²	实际灌溉/10 ⁸ m ²	实际灌溉占总面积/%	有效灌溉占总面积/%	灌溉引水量/10 ⁸ m ³	占引水总量/%
提水	105	13.78	12.59	40.0	37.2	8.36	35.2
自流引水	209	20.23	16.31	51.8	54.6	14.4	60.6
井灌	4	0.2421	0.2154	0.68	0.65	0.02	0.1
其它	15	2.781	2.364	7.15	7.51	0.97	4.1
总计	333	37.03	31.48	100	100	23.75	100

表2 研究区典型灌区概况

Table2 General situation of typical irrigation areas in the study area

概况	典型灌区		
	洮惠渠	泾河南干渠	景电灌区
河流	洮河	泾河	黄河
地形地貌	陇西黄土高原西缘 II~IV级阶地和V级阶地前缘	黄土高原沟壑区 木楔内槽形带	盆地构造地貌 多以现代活动性断裂
气候条件	温带大陆性气候、温带半干旱区	中纬度内陆气候、属温带半干旱	欧亚大陆腹地气候、属暖温带荒漠区
取水口	姬家河大桥上游右岸	柳湖乡双桥子村偏西兰公路北侧	景泰县五佛寺乡黄河左岸
控制面积/km ²	168	180	586
灌溉面积/10 ⁸ m ²	1.0	0.58	3.28
建设年份/年	民国27年(1938)	1959	1969
干渠全长/km	78.47	41.93	251.08
斗支渠/条、长度/km	165、248.04	406、266.90	1282、2 345.91
水源	洮河和三岔河	泾河崆峒水库	黄河提水
类型	自流灌区	自流灌区	提水灌区
惠济县乡镇/个	8个乡镇	5个乡镇	甘、蒙两省4县

表3 研究区典型地块概况
Table3 Overview of typical plots in the study area

概况	典型地块		
	洮惠灌区 大碧河改河段黄家坪耕地	泾河南干渠灌区崆峒区 白水镇马莲村甘肃农业大学试验田	景电泵站灌区管理局 灌溉试验站的试验田
位置	临洮县新添镇黄家坪	崆峒区白水镇马莲村	景电泵站灌区试验站的试验田
耕地面积/10 ⁴ m ²	110.3	6.67	5.47
特点	南北均匀小沟接壤、西临兰临高速公路东临洮惠渠主干渠、交通便利、地块完整	专人管理、内有灌溉明渠、渠系良好交通便利、地块完整、与跃进渠相接	交通便利、地块完整 具有较强代表性
引退水	控制良好		
主要作物占比	蒜苗 40%、白菜 30%、 马铃薯 20%、玉米及其它 10%	小麦 60%、玉米 20%及经济作物 20%	夏田:春小麦、大麦、胡麻、油籽 秋田:玉米、谷子、洋芋、甜菜、药材、瓜菜、果树 经济作物:枸杞、早酥梨、制种玉米、洋芋

的耗水量为灌区引水量与回归水量(含地表退水和下渗补给地下水)之差,即引排差耗水量。考虑到典型灌区灌溉用水特点,在水量平衡方程基础上耗水量可表示为:

$$ET_l = M - (M_q + W_d) \quad (1)$$

$$M_s = M_q + W_d \quad (2)$$

$$ET_l = M - M_s \quad (3)$$

式中:ET_l为耗水量(m³);M为引水量(m³);M_q为地表退水量(m³);W_d为地下总退水量(m³);M_s为总退水量(m³)。

《黄河水资源公报》(2018)^[12]考虑灌溉定额为排除干渠退水因素的斗口毛灌溉定额。耗水系数可表示为:

$$K_g = \frac{ET_l}{M} \quad (4)$$

式中:K_g为耗水系数,其它同前。

2.1.2 VSMB 模型

本次采用加拿大 Baier 和 Robertson 于 1966 年首次提出的 VSMB 模型(第 4 版 VSMB2000,以下简称“模型”)^[13],作为研究区土壤水分预测计算,亦是对引排法计算耗水系数的一种验证。模型的土壤水平衡方程如下:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - L_{at} - T_{ile}) \quad (5)$$

式中:SW_t为末时段土壤含水量(mm);SW₀为第i天初始土壤含水量(mm);t为计算时间(d);R_{day}为第i天降雨量(mm);Q_{surf}为第i天的地表径流量(mm);E_a为第i天蒸发量(mm);w_{seep}为第i天入渗量(mm);L_{at}为第i天壤中流(mm);T_{ile}为第i天暗管排水量(mm)。

式(5)显示,土壤水主要输入项为降水,主要输出项为蒸散发、地表径流、渗漏量、壤中流、暗管排水及基流。土壤水输入项除降水外,还应有灌溉水和潜水蒸发。另由于研究区农田并没有设置暗管,暗管排水为0。

除此之外,农田以垅形式分割,加之灌溉方式不会产生地表径流,地表径流也为0。由此式(5)可改为式(6):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} + I_{rr} + R_{evap} - E_a - w_{seep} - L_{at}) \quad (6)$$

式中:I_{rr}为第i天灌溉水量(mm);R_{evap}为第i天潜水蒸发量(mm)。

按式(6)构建模型:第一步创建模型,程序提示选择参数“控制文件”、“气象数值日值”、“Z值文件”;第二步“程序提示”,显示参数正确与错误;第三步若提示错误时,“补充输入文件”,直至“程序提示”显示输入参数正确;第四步输出成果,“格式文件”、“图形文件”及“计算结果”。其中,“控制文件”包括式(6)中的相关监测值和计算值。模型输入输出流程见图2。

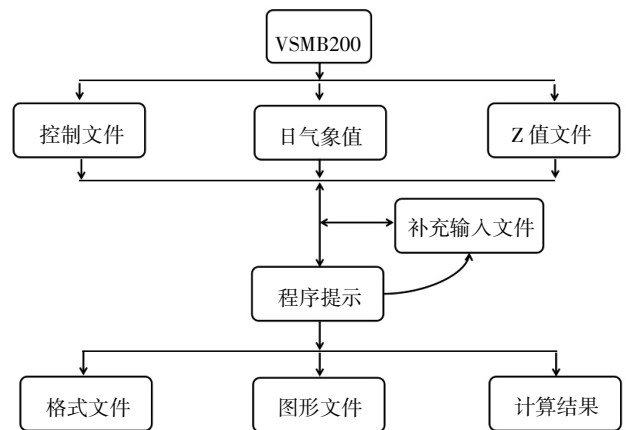


图2 模型输入输出流程
Fig.2 Model input and output process

2.2 监测断面及墒情

经查勘后布设引、退水断面洮惠渠 24 处、泾河南干渠 18 处、景电灌区 7 处。洮惠渠 24 处、泾河南干渠 18 处、景电灌区 7 处。洮惠渠和泾河南干渠水位采用人驻守

观测,景电灌区水位采用自动与人工相结合,流量都采用巡测方式。土壤含水量监测布设洮惠渠2处、泾河南干渠1处、景点灌区1组3个,仪器布设采用垂直五点法,测点深度分别为10cm、30cm、50cm、70cm、100cm(见表4)。

2.3 监测指标及时段

本次试验监测指标包括水位、流量、土壤墒情、作

物生长,监测时段为2018年春季灌溉开始至冬季灌溉结束。洮惠渠监测水位10528次、流量168份、墒情2005组、农作物14组,泾河南干渠监测水位10114次、流量80份、墒情1377组、农作物13次,景电灌区监测水位44064次、流量46份、墒情4116次、农作物13次(见表5)。

表4 监测断面及墒情监测点布设

Table4 Layout of monitoring section and soil moisture monitoring points

监测断面	洮惠渠	泾河南干渠	景电灌区
引水口	1处(塔沟)	3处(渠首、跃进渠、团结渠)	2处、1处民勤调水
退水口	16处	14处	3处
典型地块	3处引水口	1处引水	1处
	4处退水口	无退水	无退水
水位	人工驻守观测	自动+人工观测	
	矮桩式水尺24支	矮桩式水尺18支	水位计或直立式水尺7支
流量		巡测方式监测	
		流速仪+测算仪	电磁流量计
土壤墒情	1处人工(FM-TSWC)		
	1处自动(FM-XCTS1)	1处自动(ARN-TSC)	1组3个自动(RYGCM3008)

表5 监测指标及时段统计

Table5 Monitoring indicators and time statistics

监测项目		洮惠渠	泾河南干渠	景电灌区
水位	引水	时间	4/19~12/20	3/1~12/31
		段制	8、20时	8、18时
		次数	502	596
	退水	最高水位/m	1862.49	1423.51
		时间	4/19~12/20	3/1~12/31
		段制	8、20时	8、18时
地块	次数	7095	6765	
	时间	4/11~11/30	3/1~12/31	
	段制	8、14、20时	8、18时	
流量	次数	2931(引、退)	2753(引)	
	引水	10	42	
	退水	98	35	
墒情	自动	地块	60	3
		时间		4/2~12/31
		段制		每日8:00
	人工	方式		自动提取
		数据/组	1370	1377
		数据/组	1372×3	
农作物	监测	时间	4/2~12/31	
		种类	8:00(相隔5d观测1次)	
		方式	重复测3次,取平均值	
	监测	数据/组	635	
		时间	6/1~10/1	
		种类	蒜苗、白菜、马铃薯、玉米	玉米
监测	方式		人工每10d监测1次	
	组数、次数	14组		
	内容	密度、茎高、茎粗、主根	密度、茎高、主根	

3 监测试验成果

按照以上介绍的灌区监测试验方法原理及监测指标时段,开展洮惠渠、泾河南干渠、景电灌区各监测断面引退水量和相关参数的监测,对监测数据收集、整理和统计后,进行了耗水量和耗水系数的计算,具体监测及计算结果统计如下。

3.1 引退水量

对研究区渠系断面、长度、防渗措施及渠床土壤调查后,开展引退水试验监测,并对相关数据进行整理统计。

(1)典型灌区引退水量(见表6)。洮惠渠干渠总引退水量之差 $9\,882 \times 10^4 \text{m}^3$,其中5月份为种植作物灌溉期、引水量最多为 $1\,991 \times 10^4 \text{m}^3$,11月为冬灌灌溉用水较少、退水量最多为 $295 \times 10^4 \text{m}^3$;泾河南干渠总引退水量之差 $1\,553 \times 10^4 \text{m}^3$,其中干渠渠首引水量最多为 $1\,078 \times 10^4 \text{m}^3$,占总引水量的52.0%,白水沟泄水闸退水量最多为 $230 \times 10^4 \text{m}^3$,占总退水量的44.1%;景电灌区灌溉期总引退水量之差 $42\,860 \times 10^4 \text{m}^3$,其中一期4月开始提水 $14\,247 \times 10^4 \text{m}^3$,二期3月开始引水 $31\,719 \times 10^4 \text{m}^3$

(民勤生态用水 $7\,940 \times 10^4 \text{m}^3$,灌区用水 $23\,779 \times 10^4 \text{m}^3$),7月份引水量最多为 $8\,408 \times 10^4 \text{m}^3$,12月退水量最多为 $341.6 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

(2)典型地块引退水量(见表7)。洮惠渠黄家坪总引退水量之差 $105.2 \times 10^4 \text{m}^3$,其中8月引退差最大为 $20.62 \times 10^4 \text{m}^3$,9月无引水灌溉,也就无退水量;泾河南干渠农大试验田仅4月14日引水灌溉1次,引水量为 $0.1901 \times 10^4 \text{m}^3$,全部用于灌溉,无地表退水;景电灌区灌溉试验田总引水量 $3.129 \times 10^4 \text{m}^3$,也全部用于灌溉,无地表退水。

3.2 耗水量

在对引退水量监测统计的基础上,按照前2.1.1的方法及原理对耗水量进行计算。在耗水量计算时灌区渠系水利用系数采用0.41~0.48;而灌溉入渗补给系数和渠系渗漏补给系数要考虑不同灌区的实际情况,灌溉入渗补给系数洮惠渠和泾河南干渠采用0.12、景电灌区采用0.16,渠系渗漏补给系数洮惠渠和泾河南干渠采用0.15、景电灌区采用0.19。耗水量计算统计见表8~9。

表6 典型灌区引退水量统计(10^4m^3)
Table6 Statistics of water quantity of typical irrigation area

典型灌区	洮惠渠灌区			泾河南干渠			景电灌区		
引退水时段	4月19日~12月20日			3月1日~12月31日			3月1日~12月31日		
	引水量	退水量	引退之差	引水量	退水量	引退之差	引水量	退水量	引退之差
引退水量	11471	1589	9882	2076	523	1553	45966	3106	42860

表7 典型地块引退水量统计(10^4m^3)
Table7 Statistics of water quantity in typical plots

典型地块	洮惠渠黄家坪			泾河南干渠农大试验田			景电灌区灌溉试验田		
引退水时段	4月19日~12月20日			4月14日			3月1日~12月31日		
	引水量	退水量	引退之差	引水量	退水量	引退之差	引水量	退水量	引退之差
引退水量	156.8	51.6	105.2	0.1901	0	0.1901	3.129	0	3.129

表8 典型灌区耗水量计算统计(10^4m^3)
Table8 Calculation and statistics of water consumption in typical irrigation area

灌区	灌区引水量	地表退水量	灌溉入渗补给系数	渠系渗漏补给系数	灌溉入渗补给量	渠系渗漏补给量	地下总退水量	灌区总退水量	灌区耗水量
洮惠渠	11471	1589	0.12	0.15	979.4	1721	2700	4289	7182
泾河南干渠	2076	522.6	0.12	0.15	158.9	229.1	388.0	910.6	1165.4
景电灌区	45966	3106	0.16	0.19	4368	6687	11054	14160	31806

表9 典型地块耗水量计算统计(10^4m^3)
Table9 Calculation and statistics of water consumption in typical plots

地块	地块引水量	地表退水量	灌溉入渗补给系数	渠系渗漏补给系数	灌溉入渗补给量	渠系渗漏补给量	地下总退水量	地块总退水量	地块耗水量
洮惠渠黄家坪	156.8	51.64	0.12	0.15	9.80	23.52	33.32	84.96	71.84
泾河南干渠农大试验田	0.19	0	0.12	0.15	0.019	0.029	0.048	0.048	0.142
景电灌区灌溉试验田	3.129	0	0.16	0.19	0.40	0.59	0.997	0.997	2.132

3.3 耗水系数

按照以上介绍的 2.1.1、2.1.2 部分中式(4)和(6),对典型灌区、典型地块采用“引排差法”和“VSMB 模型”进行耗水系数计算,计算结果见表 10~11。

3.4 成果对比分析

对两种方法计算的耗水系数进行比较,并与《甘肃省水资源公报》中黄河流域农田灌溉耗水系数均值、与以往类似研究成果进行比较(见表 12)。

(1)对同一灌区同一地块:同一灌区之间,耗水系数差值都为负,说明引排差法计算值小于模型法值。同一地块之间,耗水系数泾河南干渠为正,其它为负。

(2)对不同灌区不同地块:不同灌区之间,引排法计算的耗水系数泾河南干渠最小,景电灌区较大;而模型计算耗水系数洮惠渠灌区最小,景电灌区最大。不同地块之间,引排法计算耗水系数洮惠渠灌区最小,泾河南干渠最大;而模型计算耗水系数洮惠渠灌区最小,景电灌区最大。

(3)与以往研究成果对比:本次确定的耗水系数均值与以往公报中黄河流域农田灌溉耗水系数均值相接

近。与王学全等关于内蒙古河套灌区引用黄河水量分析^[4]间接计算耗水系数 0.776 相接近,与凡炳文等关于甘肃陇中黄土高原农业灌溉耗水系数监测试验^[15]确定的耗水系数典型灌区 0.730、典型地块 0.671 基本一致。

综合以上存在差异的主要原因:(1)从典型灌区耗水系数计算结果来看,高扬程、远距离输水、跨流域引水耗水系数较高;(2)本次监测试验数据周期较短,降水丰、平、枯代表性不足;(3)周期系列数据较少,率定模型参数存在局限性;(4)景电灌区为高扬程大型灌区代表性较强,而自流灌区代表性不足;(5)对灌溉水下渗进入地下后,再回归地表水体量确定方法和结果不同;(6)对土壤蓄水变量计算,模型虽对灌溉水循环物理机理清晰,但耗水系数对重要参数取值较敏感;(7)引排法对小流量、大变幅和复杂构造断面监测仍会产生测验误差。

4 结论与展望

本研究采用引排差法和 VSMB 模型相结合的方法

表10 典型灌区耗水系数计算统计(10⁴m³)

Table10 Statistics for calculation of water consumption coefficient of typical irrigation area

灌区	灌区引水量	灌区耗水量	灌区耗水系数	地块	地块引水量	地块耗水量	地块耗水系数
洮惠渠	11471	7182	0.626	洮惠渠黄家坪	156.8	71.84	0.458
泾河南干渠	2076	1165.4	0.561	泾河南干渠农大试验田	0.19	0.142	0.747
景电(一期)	14247	10199	0.716	景电灌区灌溉试验田	3.129	2.132	0.681
景电(二期)	31719	21607	0.681				

表11 VSMB耗水系数模拟成果

Table11 Simulation results of VSMB water consumption coefficient

灌区名称	作物种类	降水量 /mm	灌溉水量 /10 ⁴ m ³	实际蒸散发量 /mm	深层渗漏水量 /mm	耗水系数	
						灌区	地块
洮惠渠灌区	马铃薯	331.9	310.0	335.6	242.5	0.622	0.632
	白菜	323.1	470.0	557.9	286.0	0.639	
泾河南干渠	玉米	543.1	28.0	449.1	166.8	0.708	0.708
景电灌区	玉米	239.1	670.1	666.6	187.7	0.794	0.759

表12 耗水系数成果统计比较

Table12 Statistical comparison of water consumption coefficient results

灌区名称	取水方式	耗水系数						《甘肃省水资源公报》 2012~2018年 甘肃省黄河流域均值
		灌区			地块			
		引排法	模型	差值	引排法	模型	差值	
洮惠渠灌区	自流引水	0.626	0.632	-0.006	0.458	0.632	-0.174	0.690
泾河南干渠	自流引水	0.561	0.708	-0.147	0.747	0.708	0.039	
景电灌区	高扬程	0.699	0.794	-0.095	0.681	0.759	-0.078	

法进行耗水系数试验研究, 试验过程中严格按照各项规范开展工作, 结果显示洮惠渠灌区、泾河南干渠灌区、景电灌区耗水系数分别在 0.626~0.632、0.561~0.747 和 0.681~0.794 之间。按甘肃省黄河流域不同类型灌溉面积和灌溉水量加权平均, 推算得出黄河流域灌区耗水系数分别为 0.765 和 0.740。通过本次试验研究发现, 部分灌区存在取需水和配水计划不完善, 灌溉制度不合理, 渠系最后一公里管理不善造成的干渠无效退水, 用水设施不健全、自动监测设施滞后等问题, 已成为提高灌区水资源管理水平和用水效率的瓶颈。通过试验该模型可以作为区域或流域典型灌区灌溉耗水系数计算方法。总体来说, 本次对甘肃省黄河流域典型灌区耗水系数研究是一次有益的尝试, 不但为今后相似灌区农田灌溉耗水计算积累了经验, 而且对挖掘农业节水潜力、提高农业用水效率和加强水资源管理, 也有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] Israelsen O W. Irrigation Principles and Practices [M]. New York: John Wiley & Sons, 1932.
- [2] 陈玉民, 华佑亭, 张鸿等. 华北地区冬小麦需水量图与灌溉需水量评价研究[J]. 水利学报, 1987,11:10-20. (CHEN Yumin, HUA Youting, ZHANG Hong, et al. Water requirement map and irrigation water requirement evaluation of winter wheat in North China [J]. Journal of Water Resources, 1987,11:10-20. (in Chinese))
- [3] 朱永霞. 社会水循环全过程能耗评价方法研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017,5:11-45. (ZHU Yongxia. Study on Energy Consumption Evaluation Method for the Whole Process of Social Water Cycle [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower, 2017,5:11-45. (in Chinese))
- [4] 张学成, 潘启民. 黄河流域水资源调查评价[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006. (ZHANG Xuecheng, PAN Qimin. Investigation and Evaluation of Water Resources in the Yellow River Basin [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2006. (in Chinese))
- [5] 水利部黄河水利委员会. 黄河流域综合规划:2012-2030 年[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2013. (Yellow River Water Conservancy Commission, Ministry of Water Resources. Comprehensive Planning of Water Resources in the Yellow River Basin (2012-2030) [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2013. (in Chinese))
- [6] 中国水利普查编委会. 全国第一次水利普查成果丛书[M]. 北京: 水利水电出版社, 2016. (Editorial Committee of China Water Resources Census. The First National Water Conservancy Census Results [M]. Beijing: Water Resources and Hydropower Press. (in Chinese))
- [7] 甘肃省水利厅. 2018 年甘肃省水资源公报[R]. 2019. (Water Resources Department of Gansu Province. Water resources bulletin of Gansu Province in 2018 [R]. 2019. (in Chinese))
- [8] 霍铁珍, 李生勇, 郭彦芬. ISAREG 模型在灌区土壤墒情预报中的应用研究[J]. 人民黄河, 2017,12(39):157-160. (HUO Yizhen, LI Shengyong, GUO Yanfen. Study on the application of isareg model in soil moisture prediction in irrigation area [J]. Yellow River, 2017,12(39):157-160. (in Chinese))
- [9] 郝远远. 内蒙古河套灌区水文过程模拟与作物水分生产率评估[D]. 北京: 中国农业大学, 2015. (HAO Yuan. Hydrological Process Simulation and Crop Water Productivity Assessment in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese))
- [10] 王超. 灌区用水管理与土壤水分监测[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2013. (WANG Chao. Irrigation Water Management and Soil Moisture Monitoring [D]. Xianyang: Northwest Agricultural and Forestry University, 2013. (in Chinese))
- [11] 中国水资源公报编辑部. 中国水资源公报编制技术大纲[E]. 北京: 中国水资源公报, 2009. (Editorial Department of China Water Resources Bulletin. Technical outline for compilation of China water resources bulletin [E]. Beijing: China Water Resources Bulletin, 2009. (in Chinese))
- [12] 水利部黄河水利委员会. 黄河水资源公报(2018)[R]. 郑州: 黄河水利出版社, 2019. (Yellow River Water Conservancy Committee of Ministry of Water Resources. Yellow River water resources bulletin (2018) [R]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2019. (in Chinese))
- [13] 周鸿文, 翟禄新, 吕文星, 等. 基于 VSMB 模型的灌溉水损耗模型研究[J]. 湖北农业科学, 2015,12(54):5868-5870. (ZHOU Hongwen, ZHAI Luxin, Lv Wenxing, et al. Study on irrigation water loss model based on VSMB model [J]. Hubei Agricultural Science, 2015,12(54):5868-5870. (in Chinese))
- [14] 王学全, 卢琦, 高前兆. 内蒙古河套灌区引用黄河水量分析[J]. 干旱区研究, 2005,2(22):146-151. (WANG Xuequan, LU Qi, GAO Xianzhao. Analysis of water quantity of the Yellow River in Hetao irrigation district of Inner Mongolia [J]. Arid Area Research, 2005,2(22):146-151. (in Chinese))
- [15] 凡炳文, 仲复捷. 甘肃陇中黄土高原农业灌溉耗水系数监测试验研究[J]. 地下水, 2020,1(42):83-87+254. (FAN Bingwen, ZHONG Fuzhi. Experimental study on monitoring water consumption coefficient of agricultural irrigation in Longzhong Loess Plateau of Gansu Province [J]. Groundwater, 2020,1(42):83-87+254. (in Chinese))

(下转第 12 页)